



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut für Angewandte Geowissenschaften

**Adhäsion bindiger Böden
an Werkstoffoberflächen
von Tunnelvortriebsmaschinen**

Vom Fachbereich Material- und Geowissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines

*Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)*

genehmigte Dissertation von

Dipl.-Ing. Ulrich Burbaum
aus Duisburg

Referent: Prof. Dr. Ingo Sass

Koreferent: Prof. Dr. Markus Thewes

Tag der Einreichung: 14. Juli 2009

Tag der mündlichen Prüfung: 28. September 2009

Darmstadt 2009

D 17

Zusammenfassung

Die adhäsiven Eigenschaften von bindigen Böden können bei Bearbeitung zu deren Anhaften an den Oberflächen der Bearbeitungswerkzeuge führen. Bei maschinellen Schildvortrieben führen solche Anhaftungen häufig zum Verkleben z.B. von Werkzeugen am Schneidrad oder zum Verstopfen von Transportwegen. Die Vortriebsgeschwindigkeit wird dadurch erheblich reduziert, in manchen Fällen kommt es zum Stillstand der Maschine. Verklebungen stellen daher ein erhebliches technisches und wirtschaftliches Risiko für Tunnelprojekte dar.

Als Eigenschaft des Baustoffes Boden sind dessen adhäsive Eigenschaften durch den Bauherrn zu erkunden und als Grundlage für Ausschreibung, Vergabe, Kalkulation und Risikobewertung von maschinellen Tunnelbauvorhaben zu beschreiben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf der Grundlage des Standes der Forschung ein Adhäsionsversuch weiter entwickelt, mit dem nunmehr ein geeignetes Verfahren zur Untersuchung der Adhäsionseigenschaften zur Verfügung steht.

Dem Versuch liegt ein ziehendes Trennprinzip zugrunde. Dazu wird ein Adhäsionstestzylinder als Werkstoff auf eine Bodenoberfläche mit einer definierten Andruckspannung und –dauer gedrückt und wieder abgezogen. Die Oberfläche des Bodens wird vor dem Aufdrücken des Adhäsionstestzylinders mit einer Flüssigkeit benetzt.

Mit diesem Versuch können Adhäsionsspannungen im Rahmen einer für bodenmechanische Versuche akzeptablen Reproduzierbarkeit bestimmt und schließlich Kennwerte der Adhäsionseigenschaften quantifiziert werden.

Für Adhäsionsversuche werden ein leichtplastischer Ton, der aus einem Tonstein gewonnen wurde, ein mittelpastischer und zwei ausgeprägt plastische Tone verwendet. Die Versuche offenbaren den erheblichen Einfluss der Flüssigkeit in der Grenzfläche zwischen Boden und Werkstoff. Weiterhin belegen sie, dass Rauigkeit und Material der Oberfläche der Werkstoffe einen untergeordneten Einfluss auf die Adhäsionsspannungen haben. Außerdem zeigen die Versuche, dass auch leichtplastische Tone und Tone ohne quellfähige Tonminerale Adhäsionseigenschaften zeigen können, die mit denen von Tonen mit erheblichem Anteil an quellfähigen Tonmineralen vergleichbar sind.

Physikalisch wird das Anhaften von Böden durch den Kapillardruck einer Flüssigkeit in der Grenzfläche zwischen Boden und Werkstoffoberfläche erklärt. Es handelt sich dabei um einen Grenzflächeneffekt. Der Kapillardruck wird im Rahmen dieser Arbeit als

Adhäsionsspannung definiert. Diese steigt, je kleiner der Abstand zwischen Boden und Werkstoff wird, bzw. je geringer die Dicke der Flüssigkeit bzw. je geringer das Volumen der Flüssigkeit in der Grenzfläche ist.

Das Volumen der Flüssigkeit in der Grenzfläche wird durch die Eigenschaften des Bodens über einen Transport der Flüssigkeit aus der Grenzfläche heraus bzw. in sie hinein gesteuert. Dabei bestimmen das Matrixpotenzial und die Durchlässigkeit des Bodens diesen Flüssigkeitstransport maßgebend. Der für den Flüssigkeitstransport erforderliche hydraulische Gradient wird mit Messungen des Porenwasserdrucks im Boden während eines Adhäsionsversuches nachgewiesen.

Bei dem vorliegenden Fall handelt sich um eine nichtstationäre, eindimensionale Wasserbewegung in senkrechter Richtung im ungesättigten Bereich. Mit einer vereinfachten Betrachtung nach dem Gesetz von Darcy können die gemessenen Adhäsionsspannungen aus den Ergebnissen der Porenwasserdruckmessungen theoretisch nachvollzogen werden. Es zeigt sich, dass das Konsolidationsverhalten von Böden dabei einen erheblichen Einfluss haben kann und bei leichtplastischen Böden, die ihr Porenwasser vergleichsweise leicht abgeben, nicht vernachlässigt werden kann.

Bei der Adhäsion handelt es sich um ein System mit komplexen Wechselwirkungen von Bodeneigenschaften einerseits und äußeren Einwirkungen andererseits. Hierfür wird ein bodenphysikalisches Modell entwickelt. Anhand dieses Modells werden die verschiedenen Einflussgrößen dargestellt und alle Ergebnisse der eigenen Adhäsionsversuche als auch die Ergebnisse früherer Forschungsarbeiten qualitativ erklärt.

Mit Hilfe des Adhäsionsversuches kann nunmehr das Verklebungspotenzial eines Bodens quantifiziert werden. Dazu muss das Adhäsionsverhalten eines Bodens über einen Konsistenzbereich bewertet werden. Weiterhin ist es möglich, aus dem Adhäsionsverhalten des Bodens Grundlagen für die Planung des Vortriebes zur Vermeidung von Verklebungen abzuleiten.

Abstract

Adhesive properties of cohesive soils may lead to sticking of soil to solid surfaces of the tools or parts of machines in the field of earthworks. In mechanised tunnel driving sticking of soils often results in significant clogging of the tunnel boring machine e.g. of the cutting wheel or the soil transport tracks. The productivity then decreases, in extreme cases down to zero what leads to delays and increased costs.

Adhesive properties belong to the physical soil properties. It is important to determine these adhesive properties in the geotechnical survey report as a basis for tendering and evaluation of project risks. The developed test method could be used to assess the adhesive behaviour of soils.

The test principle is a direct tension test similar to an inverse unconfined compression test. The stress state in this case is very well defined and simply interpretable. To carry this principle over into the field of soil mechanics, a solid steel cylinder is pressed on a soil surface and then pulled of. The soil surface is wetted with de-ionized water before pressing the test cylinder on the soil surface.

This test method allows quantifying adhesion stresses in a reproducible way. Parameters of adhesion could be stated.

Adhesion tests on four clays were carried out. Two clays of a high plasticity, one clay of a medium plasticity and one clay of a low plasticity were used. The test shows the importance of the fluid film in the soil-solid interface. Furthermore, the results demonstrate a minor role of materials and roughness of the solid surfaces. Clays of low plasticity are found to cause significant adhesive stresses. A clay without any swelling minerals show high adhesion stresses, too.

Adhesion forces are found to be dependent on the capillarity forces of a fluid film inside the soil-solid interface and can be understood as a boundary layer effect. Adhesion stresses increases with decreasing thickness of the fluid film, thus with a decrease of the fluid volume in the interface.

The thickness of the fluid film is controlled by pore water tension which sucks the fluid into the soil and reduces the water volume in the interface, thus its thickness. The second controlling parameter is the hydraulic conductivity of the soil matrix. The hydraulic gradient

causes a fluid transport which is shown by measurements of pore water pressure. Consolidation behaviour of soils must be also considered for clays of low plasticity.

The fluid transport is of a vertical one-dimensional, non steady state type in unsaturated conditions.

A simple method following Darcy's law for a theoretical analysis is given. Adhesion test results are calculated according to this method.

Adhesion of soils to solid surfaces is a system of complex interactions of soil physics properties and handling of the soil. A model for these interactions is presented which allows explaining all test results as well as the results from earlier research of other authors.

The clogging potential of a soil can be assessed by evaluating the adhesion behaviour of soils in test series with varying consistency. Advices for handling adhesive soils in tunnel driving were derived.

Für Regina

Für Richard

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Fachgebiet Ingenieurgeologie des Institutes für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt. Sie wurde durch Herrn Prof. Dr. rer. nat. Ingo Sass angeregt und gefördert. Für seine hervorragende Unterstützung und seine kritische Diskussion der Ergebnisse bedanke ich mich herzlich bei ihm.

Mein besonderer Dank für die Unterstützung der Arbeit, seiner Anregungen und insbesondere für die Übernahme des Ko-Referates gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum.

Den Mitarbeitern des Institutes für Angewandte Geowissenschaften danke ich sehr für die Zusammenarbeit. Herrn Prof. Dr. phil. nat. Rafael Ferreira Mählmann danke ich dabei besonders für seine Anregungen zur Tonmineralogie. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Matthias Hinderer und Herrn Dr. rer. nat. Jens Hornung danke ich für ihre Unterstützung bei den Versuchen zur Bestimmung der Permeabilität der Versuchstone.

Weiterhin danke ich Frau Gaby Schubert für die ausgezeichnete und wertvolle Arbeit bei den bodenmechanischen Laboruntersuchungen und Herrn Rainer Seehaus für den ideenreichen und handwerklich vorzüglichen Bau der Versuchsgeräte sowie der Unterstützung bei der Steuerung der Prüfpresse. Frau Petra Kraft danke ich sehr herzlich für die großartige Unterstützung der Literaturrecherchearbeit.

Frau Dr. rer. nat. habil. Annette E. Götz, Herrn Dr. rer. nat. Karl-Ernst Roehl und Herrn Dipl.-Ing. Kristian Bär danke ich sehr herzlich für die kritische und konstruktive Diskussionen sowie für die Durchsicht von Manuskripten und Versuchsergebnissen. Meinen Kollegen Dr.-Ing. Thomas Nix, Dipl.-Ing. Arne Buß, Dipl.-Ing. Marek Naser und Dipl.-Ing. Sebastian Homuth danke ich für die oft spontane, konstruktive Diskussion meiner Ideen und Ansichten.

Mein aufrichtiger Dank gilt weiterhin allen beteiligten Kolleginnen und Kollegen für die Übernahme der Rolle eines konstruktiv-kritischen Auditoriums in Probevorträgen als Vorbereitung für Tagungen.

Ebenso gilt mein Dank Frau Dipl.-Ing. Christine Hug, Herrn Dipl.-Ing. Daniel Hempel, Herrn cand.-Ing. Wladimir Kowalew, Herrn cand.-Ing. Nils Deecke, Herrn cand.-Ing. Holger Fiedler und Frau cand.-Ing. Barbara Breuer, die als Studierende im Rahmen von Studien- und

Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskräfte zu dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben.

Herrn Hans-Jürgen Schroeder von der Staatlichen Materialprüfungsanstalt in Darmstadt, Abteilung Oberflächentechnik danke ich für die unkomplizierte und sehr hilfreiche Untersuchung der Oberflächen der Adhäsionstestzylinder.

Für die wertvollen Hinweise zum Adhäsionsversuch und zum Versuchsgerät danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Placzek und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Estermann.

Weiterhin möchte ich Herrn Dr.-Ing. Heribert Düsing, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Böhme und Herrn Dipl.-Ing. Uwe Steinbock von der Firma Wayss & Freytag Ingenieurbau AG in Frankfurt für die hervorragende Zusammenarbeit bei dem Projekt „Emscrossing“ sehr herzlich danken.

Der Firma Stephan Schmidt KG in Dornburg, Herrn Dr. Matthias Schellhorn und Herrn Dipl.-Ing. Othmar Latief, der Firma Erbslöh Lohrheim GmbH in Lohrheim sowie der Fa. Süd-Chemie, Herrn Dr. Rolf Ahlers danke ich für die Versuchstone, die mir freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden. Weiterhin gilt mein Dank hierfür Herrn Dipl.-Geol. Marcus Schneider.

Mein herzlicher und aufrichtiger Dank gilt insbesondere aber meiner Frau Regina, die mich während der gesamten Dauer der Arbeit und insbesondere in der finalen Phasen der Arbeit in exzellenter Weise unterstützt hat, sowie meinem Sohn Richard, der mich mit seiner fröhlichen und aufgeschlossenen Natur immer wieder motiviert hat.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	III
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XX
Abkürzungsverzeichnis	XXII
Verzeichnis der Formelzeichen	XXIII
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Adhäsion	4
2.1 Definition der Begriffe Adhäsion und Kohäsion	4
2.2 Industrielle Anwendungen von Adhäsionskräften	4
2.3 Messung von Adhäsionskräften	5
2.4 Haftmechanismen	7
2.5 Maßgebender Haftmechanismus	8
2.5.1 Diskussion der Haftmechanismen	8
2.5.2 Adsorption bei Mineralkörnern	8
2.5.3 Kapillarkräfte als maßgebender Haftmechanismus	11
3 Adhäsionsmodell	13
3.1 Voraussetzung für Kapillarkräfte	13
3.2 Versuche zur Messung der Adhäsion zwischen Stahloberflächen	13
3.3 Kapillarmodell für Festkörperoberflächen	15
4 Verklebungen bei der Bearbeitung von Böden	24
4.1 Allgemein	24
4.2 Verklebungen im maschinellen Tunnelbau	25
4.3 Verklebungsprozess	25
4.4 Geotechnische und verfahrenstechnische Aspekte	26
5 Stand des Wissens	29
5.1 Arbeiten zur Untersuchung von Anhaftungen an Werkstoffoberflächen	29
5.1.1 Untersuchungen von Schachbasian	29
5.1.2 Untersuchungen von Atterberg	30
5.1.3 Untersuchungen von Nichols	31
5.1.4 Untersuchungen von Fountaine	31
5.1.5 Untersuchungen von Rumpf	33
5.1.6 Untersuchungen von Potyondy	34
5.1.7 Untersuchungen von Riek	35
5.1.8 Untersuchungen von Wolkewitz	36
5.1.9 Untersuchungen von Schubert	37

	5.1.10	Untersuchungen von Littleton	38
	5.1.11	Untersuchungen von Schütz	38
	5.1.12	Untersuchungen von Schlick	39
	5.1.13	Untersuchungen von Jancsecz	41
	5.1.14	Untersuchungen von Beretitsch	42
	5.1.15	Untersuchungen von Hollinderbäumer und Hoberg	43
	5.1.16	Untersuchungen von Wilms	44
	5.1.17	Untersuchungen von Thewes	45
	5.1.18	Untersuchungen von Strauss et al.	48
	5.1.19	Weitere Arbeiten zur Haftung von kugelförmigen Feststoffen	49
	5.1.20	Weitere Arbeiten zur Untersuchung des Anhaftens von Böden nach einem scherenden Trennprinzip	49
	5.2	Zusammenfassung der Literatur über Versuche zur Messung von Adhäsion an Festkörperoberflächen	49
6		Adhäsionsmessgerät und -verfahren	52
	6.1	Versuchsprinzip	52
	6.2	Adhäsionsmessgerät	52
	6.3	Adhäsionsmessverfahren	55
	6.4	Vorbereitung und Einbau des Bodens in den Probenring	59
	6.5	Homogenität des Einbaus	62
	6.6	Orientierung der Tonpartikel	63
7		Versuchstone	65
	7.1	Auswahl der Versuchstone	65
	7.2	Herkunft und mineralogische Zusammensetzung der Versuchstone	66
	7.2.1	Versuchston KI-S	66
	7.2.2	Versuchston KI-W	67
	7.2.3	Versuchston ISK-E	68
	7.2.4	Versuchston SI-B	69
	7.3	Bodenmechanische Kennwerte	70
	7.4	Permeabilität der Versuchstone	73
8		Adhäsionsversuche	78
	8.1	Allgemein	78
	8.2	Eignungsversuche	78
	8.3	Versuchsprogramm	80
	8.4	Ergebnisse	80
	8.4.1	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Konsistenz	80
	8.4.2	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Andruckspannung	83

8.4.3	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Andruckdauer und der Benetzungsdauer	85
8.4.4	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Rauigkeit der Werkstoffoberfläche und des Materials	88
8.4.5	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Benetzung	90
8.4.6	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Temperatur	92
8.5	Bezug zu bodenmechanischen Kennwerten	95
8.5.1	Bodenmechanische Kennwerte	95
8.5.2	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der Trockendichte	96
8.5.3	Adhäsionsspannungen in Bezug zur Porenzahl und der Plastizität.....	96
8.5.4	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Permeabilität.....	97
8.6	Fehlerbetrachtung.....	98
9	Adhäsionsversuche mit Messung des Porenwasserdruckes	100
9.1	Versuchsbeschreibung	100
9.2	Messungen des Porenwasserdruckes in Adhäsionsversuchen.....	102
9.2.1	Allgemein	102
9.2.2	Saugspannung der Versuchstone.....	103
9.2.3	Porenwasserdruckmessungen am Versuchston SI-B.....	104
9.2.4	Porenwasserdruckmessungen am Versuchston ISK-E	105
9.2.5	Porenwasserdruckmessungen am Versuchston KI-S.....	107
9.2.6	Bewertung der Porenwasserdruckmessungen	109
10	Bodenphysikalisches Adhäsionsmodell	110
10.1	Annahmen	110
10.2	Modell für den Flüssigkeitstransport	110
10.3	Potenzialentwicklung während des Adhäsionsversuches	114
10.3.1	Potenzialtheorie	114
10.3.2	Potenzialentwicklung an einem ausgewählten Adhäsionsversuch	118
10.4	Adhäsion als Funktion des Wassertransportes	124
10.5	Rechnerische Abschätzung der Adhäsionsspannungen	125
10.5.1	Vereinfachungen und Annahmen	126
10.5.2	Abschätzung für Versuchston SI-B	129
10.5.3	Abschätzung für Versuchston ISK-E.....	130
10.5.4	Bewertung der rechnerischen Abschätzung der Adhäsionsspannungen	132
11	Diskussion des Adhäsionsmodells	133
11.1	Abhängigkeit von der Matrixspannung und der Permeabilität	133
11.2	Abhängigkeit von der Plastizität.....	135

11.3	Abhängigkeit von der Konsistenz	136
11.4	Abhängigkeit von der Andruckspannung	137
11.5	Abhängigkeit von der Andruckdauer und der Benetzungsdauer	139
11.6	Abhängigkeit von der Trenngeschwindigkeit	141
11.7	Abhängigkeit von der Rauigkeit und der Form der Oberfläche des Werkstoffes	142
11.7.1	Trennversuche nach dem ziehenden Trennprinzip	142
11.7.2	Trennversuche nach dem scherenden Trennprinzip	144
11.8	Abhängigkeit vom Material des Werkstoffes	145
11.9	Abhängigkeit von der Benetzung	146
11.10	Abhängigkeit von der Viskosität der Benetzungsflüssigkeit	147
11.11	Abhängigkeit von der Elektrolytkonzentration	148
11.12	Abhängigkeit von der Oberflächenspannung des Fluides	149
11.13	Abhängigkeit von polymeren Zusätzen zur Benetzungsflüssigkeit	149
12	Folgerungen für die Planung und Bauausführung	151
12.1	Quantifizierung des Verklebungspotenzials eines Bodens	151
12.2	Bewertung des Adhäsionsverhalten des Versuchstone	153
12.3	Maßnahmen zur Vermeidung von Verklebungen	155
12.4	Reagglomeration von gelöstem Boden	156
12.5	Aspekte der Baugrunderkundung	157
13	Ausblick	158
	Literaturverzeichnis	159
	Anhang A: Tone und Tonminerale	170
A.1	Abgrenzung	170
A.2	Komponenten der Tonminerale	170
A.3	Bau der Tonminerale	173
A.4	Schichtstruktur der Tonminerale	176
A.5	Arten von Tonmineralen	177
A.6	Ausgewählte Tonminerale	178
A.7	Oberflächenladung, Kantenladung und Kationenaustauschkapazität	180
A.8	Wasseraufnahme	182
	Anhang B: Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM)	191
	Anhang C: Spaltzugversuche	193

Anhang D: Struktur von Oberflächen	196
Anhang E: Rauheit von Oberflächen.....	197
Anhang F: Protokolle der Rauheitsmessungen der Adhäsionstestzylinder.....	200
Versicherung	206
Curriculum Vitae.....	207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Schneidrad einer TBM mit großflächigen Verklebungen, Sydney Airport Rail Link, Granit-Tonformation, Foto Copyright Fa. Bouygues [Thewes, 1999].....	1
Abbildung 2.1:	Trennprinzipien, in Anlehnung an Habenicht [2006].....	6
Abbildung 2.2:	Haftmechanismen [in Anlehnung an Rumpf, 1958]	7
Abbildung 2.3:	Diffuse Doppelschicht [in Anlehnung an Scheffer & Schachtschnabel, 1998]	10
Abbildung 2.4:	Modell für die Bindung von Wassermolekülen an einer geladenen Feststoffoberfläche [verändert nach Kézdi, 1969].....	10
Abbildung 2.5:	Dicke des Wasserfilms für gemessene Adhäsionsspannungen, Grenzabstände für Haftmechanismen ohne Materialbrücken	11
Abbildung 3.1:	Adhäsionsversuch an Adhäsionstestzylindern	14
Abbildung 3.2:	Ergebnisse Adhäsionsversuch an Adhäsionstestzylindern.....	15
Abbildung 3.3:	Kapillarmodell für Festkörperoberflächen.....	16
Abbildung 3.4:	Kapillarkraftmodell	17
Abbildung 3.5:	Randwinkel	18
Abbildung 3.6:	Randkraftmodell.....	19
Abbildung 4.1:	Verklebtes Bohrgestänge [Strauss et al., 2009]	24
Abbildung 5.1:	Adhäsionswaage nach Schachbasian [1890]	30
Abbildung 5.2:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Saugspannung [verändert nach Fountaine, 1954].....	32
Abbildung 5.3:	Modell für den Haftmechanismus zwischen zwei Kugeln infolge einer Flüssigkeitsbrücke, Berechnung des Zwickelvolumens [verändert nach Pietsch & Rumpf, 1967].....	34
Abbildung 5.4:	Adhäsionskräfte in Abhängigkeit des Werkstoffes [verändert nach Riek, 1963].....	36

Abbildung 5.5:	Flüssigkeitsbrücke zwischen einer Kugel und einer Platte [Schütz, 1979].....	39
Abbildung 5.6:	Adhäsion in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl I_c und der Plastizitätszahl I_p [verändert nach Schlick, 1989].....	40
Abbildung 5.7:	Adhäsionszonen 0, I, II und III in Abhängigkeit der Konsistenz und der Plastizität [verändert nach Schlick, 1989].....	40
Abbildung 5.8:	Adhäsion (scherendes Trennprinzip) in Abhängigkeit von den Plastizitätsgrenzen [Jancsecz, 1991].....	41
Abbildung 5.9:	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit nach Beretitsch [1992]	42
Abbildung 5.10:	Reibungskoeffizient und Adhäsion in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Böden A, B und C nach Beretitsch [1992].....	43
Abbildung 5.11:	Haftspannung in Abhängigkeit des Korndurchmessers [verändert nach Hollinderbäumer & Hobert, 1994]	44
Abbildung 5.12:	Adhäsionsversuch [verändert nach Thewes, 1999].....	45
Abbildung 5.13:	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Konsistenz der Versuchsböden [verändert nach Thewes, 1999]	46
Abbildung 5.14:	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Benetzungsflüssigkeit [verändert nach Thewes, 1999]	47
Abbildung 5.15:	Verklebungspotenzial für Schildvortriebe [verändert und ergänzt nach Thewes, 2003]	48
Abbildung 6.1:	Querschnitte 1-1 und 2-2 durch das Adhäsionsmessgerät	52
Abbildung 6.2:	Adhäsionsmessgerät und Adhäsionstestzylinder	53
Abbildung 6.3:	Adhäsionstestzylinder.....	54
Abbildung 6.4:	Visualisierungen der Oberflächenbeschaffenheiten der Adhäsionstestzylinder.....	54
Abbildung 6.5:	Versuchsphasen.....	56
Abbildung 6.6:	Charakteristischer Versuchsverlauf.....	57

Abbildung 6.7:	Ergebnisse von Adhäsionsversuchen am Versuchston KI-W (feinpolierter Adhäsionstestzylinder ($\sigma_D = 20$ kN/m ² , $t_B = 1$ min, $t_D = 1$ min, $t_E = 30$ s).....	58
Abbildung 6.8:	Adhäsionsmessgerät und Adhäsionstestzylinder in der Prüfpresse	58
Abbildung 6.9:	Trennbruch in der Bodenprobe.....	59
Abbildung 6.10:	Homogenisierung eines Versuchstons	60
Abbildung 6.11:	Einbau und Verdichtung eines Versuchstons mit dem Proctorhammer	61
Abbildung 6.12:	Grobes Abschneiden des überstehenden Tons	61
Abbildung 6.13:	Abziehen der Oberfläche und Haarlineal.....	62
Abbildung 6.14:	Oberflächen der Versuchstone SI-B und ISK-E nach der Bearbeitung der Oberflächen	64
Abbildung 7.1:	Röntgendiffraktogramm Versuchston KI-S (Texturpräparat der Tonfraktion).....	66
Abbildung 7.2:	Versuchston KI-S, Tonstein und Kalkstein in Wasserlagerung.....	67
Abbildung 7.3:	Röntgendiffraktogramm Versuchston KI-W (Texturpräparat der Tonfraktion).....	68
Abbildung 7.4:	Röntgendiffraktogramm Versuchston ISK-E (Texturpräparat der Tonfraktion).....	69
Abbildung 7.5:	Röntgendiffraktogramm Versuchston SI-B (Texturpräparat der Tonfraktion).....	70
Abbildung 7.6:	Korngrößenverteilung der Versuchstone	72
Abbildung 7.7:	Plastizitätsdiagramm der Versuchstone	72
Abbildung 7.8:	Versuchsprinzip Gasdrucksäulenpermeameter	74
Abbildung 7.9:	Permeabilitäten der Versuchstone (n = Anzahl der Versuche)	75
Abbildung 7.10:	Permeabilität und Sättigung.....	76
Abbildung 8.1:	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Konsistenz, Versuchston KI-W, (feinpolierter	

	Adhäsionstestzylinder, Rauigkeit $R_z = 0,1 \mu\text{m}$, $\sigma_D = 20$ kN/m^2 , $t_B = 1 \text{ min}$, $t_D = 1 \text{ min}$, $t_E = 40 \text{ s}$).....	78
Abbildung 8.2:	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Konsistenz	81
Abbildung 8.3:	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Andruckspannung.....	84
Abbildung 8.4:	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Andruckdauer	86
Abbildung 8.5:	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Benetzungsdauer.....	87
Abbildung 8.6:	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit, dem Material und der Andruckspannung.....	88
Abbildung 8.7:	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Benetzung und der Andruckspannung ($I_C = 0,95$)	91
Abbildung 8.8:	Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur	93
Abbildung 8.9:	Versuchsergebnisse für Adhäsionsversuche bei 5°C und 20°C , Versuchston KI-W, $I_C = 0,95$, Andruckspannung $\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$ (nur Trennphase dargestellt).....	93
Abbildung 8.10:	Unterschiede der Oberflächenspannung und der dynamischen Viskosität für 5°C und 20°C	94
Abbildung 8.11:	Mittlere Trockendichten und Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt ($\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$)	96
Abbildung 8.12:	Bezogene Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Plastizität	97
Abbildung 8.13:	Adhäsionsspannungen und Permeabilitäten in Abhängigkeit von der Konsistenz	97
Abbildung 8.14:	Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung in Prozent des Mittelwertes der Versuchsreihen	99
Abbildung 9.1:	Versuchsaufbau Adhäsionsversuch mit Messung des Porenwasserdruckes	100

Abbildung 9.2:	Minitensiometer	101
Abbildung 9.3:	Herstellen der Bohrung für Tensiometer 1 durch Führungshülse	102
Abbildung 9.4:	Adhäsionsversuch mit Messung des Porenwasserdruckes	102
Abbildung 9.5:	Saugspannung der Versuchstone KI-S, ISK-E und SI-B	103
Abbildung 9.6:	Porenwasserdruckmessung Versuchston SI-B, Tensiometer 1, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$	104
Abbildung 9.7:	Porenwasserdruckmessungen Versuchston SI-B, Tensiometer 1, 2 und 3, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$	105
Abbildung 9.8:	Porenwasserdruckmessungen Versuchston ISK-E, Tensiometer 1, 2 und 3, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$	106
Abbildung 9.9:	Porenwasserdruckmessung Versuchston ISK-E, Tensiometer 1, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$	107
Abbildung 9.10:	Porenwasserdruckmessung Versuchston KI-S, Tensiometer 1, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$	108
Abbildung 9.11:	Porenwasserdruckmessungen Versuchston KI-S, Tensiometer 1, 2 und 3, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$	109
Abbildung 10.1:	Flüssigkeitstransport in der Benetzungsphase	110
Abbildung 10.2:	Beginn der Andruckphase	111
Abbildung 10.3:	Detail: Aufdrücken des Adhäsionstestzylinders auf die Oberfläche der Probe	111
Abbildung 10.4:	Probenoberfläche nach Abziehen des Adhäsionstestzylinders	112
Abbildung 10.5:	Flüssigkeitstransport in der Andruckphase	112
Abbildung 10.6:	Flüssigkeitstransport in der Eigengewichtsphase	113
Abbildung 10.7:	Flüssigkeitstransport in der Trennphase	113
Abbildung 10.8:	Wasseraufnahme verschiedener Tone und von Quarzmehl [verändert und ergänzt nach Kézdi ¹⁾ , 1969 und von Soos ²⁾ , 2001]	115

Abbildung 10.9:	Charakteristische Matrixpotenziale von Sand-, Schluff- und Tonböden, [verändert und ergänzt nach Scheffer & Schachtschnabel, 1998]	116
Abbildung 10.10:	Zusammenhang zwischen Gravitations- bzw. Druckpotenzial und Matrixpotenzial, Zeitpunkt vor Einstellen der Bodensäule in den Wasserbehälter	117
Abbildung 10.11:	Zusammenhang zwischen Gravitations- bzw. Druckpotenzial und Matrixpotenzial, Zeitpunkt unmittelbar nach Einstellen eines Wasserspiegels im Boden	117
Abbildung 10.12:	Zusammenhang zwischen Gravitations- bzw. Druckpotenzial und Matrixpotenzial, Gleichgewichtszustand	117
Abbildung 10.13:	Potenzial nach dem Einbau	119
Abbildung 10.14:	Potenziale und Strömung Benetzungsphase.....	120
Abbildung 10.15:	Potenziale und Strömung Andruckphase	121
Abbildung 10.16:	Potenziale und Strömung Eigengewichtsphase	122
Abbildung 10.17:	Potenziale und Strömung Trennphase	123
Abbildung 10.18:	Vereinfachung des hydraulischen Gradienten, Versuchston SI-B.....	127
Abbildung 11.1:	Abhängigkeit der Adhäsion vom Matrixpotenzial.....	133
Abbildung 11.2:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Durchlässigkeit	134
Abbildung 11.3:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Konsistenz (mit Benetzung der Probenoberfläche).....	136
Abbildung 11.4:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Andruckspannung.....	138
Abbildung 11.5:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Andruckdauer	139
Abbildung 11.6:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Benetzungsdauer.....	140
Abbildung 11.7:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Trenngeschwindigkeit.....	141
Abbildung 11.8:	Abhängigkeit der Adhäsion von der Trenngeschwindigkeit.....	142
Abbildung 11.9:	Rauhigkeit und Dicke des Flüssigkeitsfilmes.....	143

Abbildung 11.10: Abhängigkeit der Adhäsion von der Viskosität der Benetzungsflüssigkeit	147
Abbildung 11.11: Abhängigkeit der Adhäsion von Elektrolytkonzentration der Benetzungsflüssigkeit.....	148
Abbildung 12.1: Verklebungspotenzial von Böden	152
Abbildung 12.2: Verklebungspotenzial von Böden	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Restwassermengen	14
Tabelle 5.1	Materialien und Böden der Untersuchungen von Fountaine [1954].....	31
Tabelle 5.2	Bindungsmechanismen [verändert nach Rumpf, 1958].....	33
Tabelle 5.3	Eigenschaften der Adhäsionszonen [verändert nach Schlick, 1989]	41
Tabelle 5.4	Zusätze zum Benetzungswasser [verändert nach Thewes, 1999]	46
Tabelle 5.5	Übersicht über experimentelle Arbeiten zum Anhaften von Böden an Werkstoffoberflächen.....	50
Tabelle 5.6	Übersicht über die wichtigsten experimentellen Arbeiten	51
Tabelle 6.1	Adhäsionstestzylinder und Rauigkeit.....	53
Tabelle 6.2	Statistische Angaben zum Einbau der Versuchstone	63
Tabelle 7.1	Systematik der Bezeichnung der Versuchstone	65
Tabelle 7.2	Gesamtkohlenstoffgehalt (TC), mineralisch gebundener Kohlenstoff (TIC) und organischer Kohlenstoffgehalt (TOC) des Versuchstons ISK-E	69
Tabelle 7.3	Bodenmechanische Kennwerte der Versuchstone	71
Tabelle 7.4	Spaltzugfestigkeit der Versuchstone KI-W und SI-B	73
Tabelle 7.5	Statistische Angaben zu den Permeabilitätsmessungen.....	77
Tabelle 8.1	Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl, Versuchston KI-W.....	79
Tabelle 8.2	Untersuchte Konsistenzen.....	81
Tabelle 8.3	Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Konsistenzabhängigkeit der Adhäsionsspannungen ($\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$)	82
Tabelle 8.4	Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Andruckspannung	85

Tabelle 8.5	Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Andruckdauer.....	86
Tabelle 8.6	Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Benetzungsdauer.....	87
Tabelle 8.7	Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Oberflächenrauigkeit und des Materials	89
Tabelle 8.8	Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Benetzung	92
Tabelle 8.9	Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Temperatur.....	94
Tabelle 8.10	Zustandskennwerte der Versuchstone	95
Tabelle 10.1	Matrixpotenzialänderungen, durchströmte Längen und Dauer in den Versuchsphasen, Versuchston SI-B	129
Tabelle 10.2	Matrixpotenzialänderungen, durchströmte Längen, Dauer und Durchlässigkeitskoeffizient in den Versuchsphasen, Versuchston ISK-E.....	131
Tabelle 10.3	Vergleich der berechneten und der gemessenen Adhäsionsspannungen	132

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
etc.	et cetera
et al.	et alii
Fa.	Firma
ggf.	gegebenenfalls
Gln.	Gleichung
i.A.	im Allgemeinen
i.M.	im Mittel
i.d.R.	in der Regel
Kap.	Kapitel
s.o.	siehe oben
sog.	sogenannt, sogenannte, sogenannter, sogenanntes
s.u.	siehe unten
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
z.T.	zum Teil

Verzeichnis der Formelzeichen

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
A	Durchströmte Fläche	Länge ²	[m ²]
A _{Pr}	Verdichtungsarbeit Proctorversuch	Kraft·Länge/Länge ³	[MNm/m ³]
c	Kohäsion	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
c	Elektrolytkonzentration		
d ₁	Durchmesser der Festkörper	Länge	[m]
d ₂	Abstand der Festkörperoberflächen	Länge	[m]
e	Porenzahl	Länge ³ / Länge ³	[%]
F _{Ges}	Äußere Zugkraft	Kraft	[kN]
F _I	Innere Zugkraft	Kraft	[kN]
F _K	Kapillarkraft	Kraft	[kN]
F _R	Randkraft	Kraft	[kN]
F _{R,n}	Randkraft, normal zur Oberfläche	Kraft	[kN]
g	Erdbeschleunigung	Länge / Zeit ²	[m/s ²]
I _C	Konsistenzzahl	Masse / Masse	[-]
I _P	Plastizitätszahl	Masse / Masse	[-], [%]
K	Permeabilität	Länge ²	[m ²]
k	Durchlässigkeitskoeffizient	Länge / Zeit	[m/s]
l	Durchströmte Länge	Länge	[m]
m _f	Feuchtmasse	Masse	[kg]
n	Anzahl	Zahl	[Stück]
n	Porenanteil	Länge ³ / Länge ³	[%]
n _a	Anteil der luftgefüllten Poren	Länge ³ / Länge ³	[%]
p _K	Kapillardruck, Kapillarspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
p _A	Druck in der umgebenden Atmosphäre	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
p _{Fl}	Flüssigkeitsdruck	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
Δp	Druckunterschied	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
q _{SZ}	Spaltzugfestigkeit	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
Q	Volumenstrom	Länge ³ / Zeit	[m ³ /s]
r ₁	Radius der Festkörper	Länge	[m]
r ₂	Radius des Meniskus der Kapillarflüssigkeit	Länge	[m]
R _z	Rauhigkeit	Länge	[m]
s	Standardabweichung	-	-
t	Zeiteinheit	Zeit	[s]
TC	Gesamter Kohlenstoffgehalt	Masse / Masse	[-], [%]
TIC	Mineralisch gebundener Kohlenstoffgehalt	Masse / Masse	[-], [%]
TOC	Organisch gebundener Kohlenstoffgehalt	Masse / Masse	[-], [%]
U	Umfangslänge der Kapillarflüssigkeit	Länge	[m]
v _T	Trenngeschwindigkeit	Länge / Zeit	[m/s]

V	Volumen des Wassers	Länge ³	[m ³]
V_{Ca}	Kalkgehalt	Masse / Masse	[-], [%]
V_{gl}	Glühverlust	Masse / Masse	[-], [%]
V_{Rest}	Restwassermenge	Länge ³	[m ³]
w	Wassergehalt	Masse / Masse	[-], [%]
w_A	Wasseraufnahme	Masse / Masse	[-], [%]
w_L	Wassergehalt an der Fließgrenze	Masse / Masse	[-], [%]
w_P	Wassergehalt an der Ausrollgrenze	Masse / Masse	[-], [%]
w_S	Wassergehalt an der Schrumpfgrenze	Masse / Masse	[-], [%]
z	Tiefe unter der Oberfläche	Länge	[m]
δ	Randwinkel	Bogenmaß	[-]
φ	Reibungswinkel	Bogenmaß	[-]
γ	Oberflächenspannung der Kapillarflüssigkeit	Druck, Spannung	[kN/m ²]
γ_{Wasser}	Wichte des Wassers	Kraft / Länge ³	[kN/m ³]
η	Dynamische Viskosität des Fluides	Druck·Zeit	[Pa·s]
σ_A	Adhäsionsspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
$\sigma_{A,th}$	theoretische Adhäsionsspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
$\sigma_{A,R}$	Adhäsionsspannung aus Randkräften	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
σ_D	Andruckspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
σ_E	Eigengewichtsspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
σ_A	Adhäsionsspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
θ	volumetrischer Wassergehalt	Länge ³ / Länge ³	[-], [%]
ρ_d	Trockendichte	Masse / Länge ³	[kg/m ³]
ρ_s	Korndichte	Masse / Länge ³	[kg/m ³]
ρ_{FL}	Dichte des Fluides	Masse / Länge ³	[kg/m ³]
σ_n	Normalspannung in der Scherfuge	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
σ_A^{Ic}	Adhäsionsindex	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
τ	Scherwiderstand	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
Ψ_m	Matrixpotenzial	Druck	[kN/m ²], [mWs]
Ψ_z	Gravitationspotenzial	Druck	[kN/m ²], [mWs]
Ψ_p	Druckpotenzial	Druck	[kN/m ²], [mWs]
z	Tiefe	Länge	[m]

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die adhäsiven Eigenschaften von bindigen Böden können bei deren Bearbeitung zum Anhaften an den Oberflächen von Werkzeugen führen. In der Bauindustrie stellen solche Anhaftungen an Baumaschinen ein z.T. gravierendes Problem im Bezug auf die Leistungsfähigkeit dieser Maschinen dar. So können an Abbauwerkzeugen von Baumaschinen so große Bodenmengen anhaften, dass die Leistung erheblich herabgesetzt wird oder die Abbauwerkzeuge wirkungslos werden [Kühn, 1989 und Kühn 1990]. Dies wird als Verkleben der Werkzeuge oder der Maschinen bezeichnet.

Bei maschinellen Schildvortrieben stellen Verklebungen ein hohes Risiko dar [Burger, 2006]. In bindigen Böden können starke Verklebungen an den Abbauwerkzeugen des Schneidrades (Abbildung 1.1), in der Abbaukammer, vor Öffnungen von Transportleitungen oder an Transportbändern und deren Übergabestationen auftreten. Diese Verklebungen vermindern die Vortriebsleistung z.T. in erheblichem Maße bis hin zum Stillstand der Vortriebsmaschine. Meist sind dann aufwendige manuelle Arbeiten in der Abbaukammer zum Beseitigen der Verklebungen erforderlich. Dies stellt ein erhebliches technisches und wirtschaftliches Risiko für Tunnelvortriebe in bindigen, zum Verkleben neigenden Böden dar.

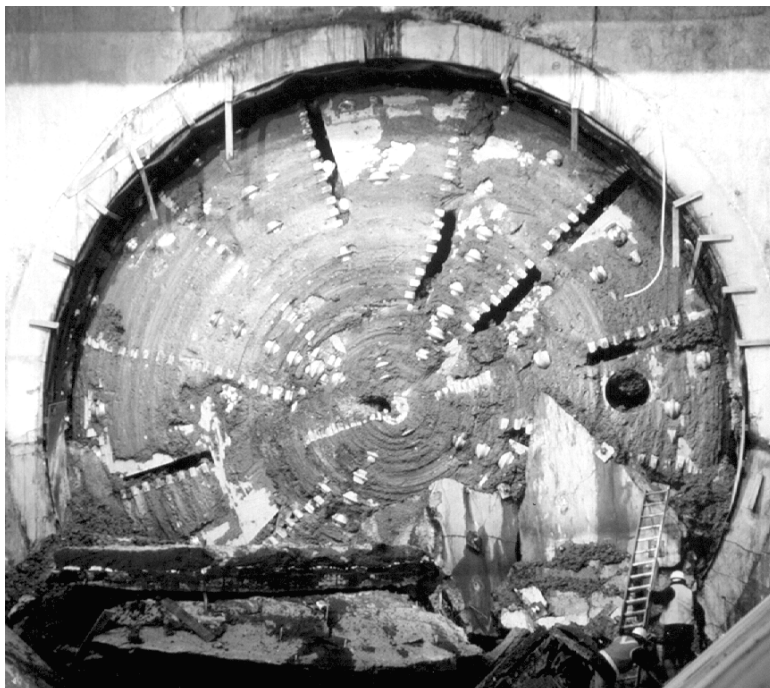


Abbildung 1.1: Schneidrad einer TBM mit großflächigen Verklebungen, Sydney Airport Rail Link, Granit-Tonformation, Foto Copyright Fa. Bouygues [Thewes, 1999]

In Anbetracht der immensen Kosten für einen maschinellen Tunnelvortrieb und den sich aus Leistungsminderungen ergebenden wirtschaftlichen und terminlichen Folgen von

Verzögerungen oder Stillständen wird die Bedeutung von Verklebungen deutlich. Hierbei muss man außerdem noch die Folgekosten für Bauzeitverlängerungen, Terminüberschreitungen, Konventionalstrafen, etc. berücksichtigen.

Das Anhaften von Böden an Werkstoffoberflächen wurde bereits 1838 wissenschaftlich untersucht, wobei sich diese ersten Arbeiten auf landwirtschaftliche Aufgabenstellungen beziehen [Schachbasian, 1890]. Atterberg [1911], Terzaghi [1925] und Terzaghi & Peck [1961] beschreiben ab Anfang des 20. Jahrhunderts für bodenmechanische Zwecke eine „Klebegrenze“ in Abhängigkeit der Konsistenz von Tonböden. Untersuchungen zu verfahrenstechnischen Fragestellungen des Erdbaus folgten ab den späten 1980 Jahren [Schlick, 1989, Beretitsch, 1992]. Ab 1990 wurden Untersuchungen speziell für tunnelbautechnische Fragestellungen vor dem Hintergrund der ständigen Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von Tunnelbohrmaschinen bis in stark tonige, zum Verkleben neigende Böden notwendig [Jancsecz, 1991], [Wilms, 1995], [Thewes, 1999].

Die adhäsiven Eigenschaften sind eine Eigenschaft des Baustoffes Boden und als solche durch den Bauherrn zu erkunden und zu beschreiben. Die Ergebnisse der Erkundung sind Grundlage für Ausschreibung, Vergabe, Kalkulation und Risikobewertung von maschinellen Tunnelbauvorhaben.

Einen ersten Versuch, die adhäsiven Eigenschaften von Böden im Rahmen eines genormten Versuches zu quantifizieren wurde 1973 mit der nicht mehr gültigen DIN 19683: „Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau: Physikalische Bodenuntersuchungen, Bestimmung der Adhäsion“ unternommen. Diese DIN wurde jedoch nach kurzer Zeit zurückgezogen, da es in diesem Bereich damals keinen Bedarf für die Untersuchungen gab. Bis heute steht keine Norm und auch kein standardisierter bodenmechanischer Laborversuch zur Messung adhäsiver Eigenschaften von Böden Verfügung.

Die Ursachen der Adhäsion, die Abhängigkeit der Adhäsionskräfte von den bodenmechanischen sowie von den mineralogischen Eigenschaften der Böden sind in verschiedenen Arbeiten intensiv deskriptiv untersucht (Kap. 5). Ein befriedigendes, allgemein anerkanntes bodenphysikalisches Modell existiert aber jedoch noch nicht. Ein Ansatz hierzu ist von Thewes [1999] beschrieben. Die Interaktion verschiedener Einflussgrößen muss daher noch weiter erforscht werden, um allgemeingültige, bodenphysikalische Gesetze zu formulieren. Dies soll die Grundlage für die ingenieurmäßige Planung von z.B. bau- oder verfahrens-technischen Maßnahmen zur Verhinderung oder Verminderung des Verklebens von Abbauwerkzeugen von Tunnelvortriebsmaschinen liefern.

Hieraus ergeben sich die Ziele der vorgelegten Arbeit. Zunächst soll ein bodenmechanischer Standardversuch entwickelt werden. Dieser Versuch soll so konzipiert sein, dass es kommerziellen bodenmechanischen Laboren möglich ist, die adhäsiven Eigenschaften eines Bodens standardmäßig zu untersuchen, zu beschreiben und zu klassifizieren. Die Anforderungen an einen solchen Adhäsionsversuch sind [Burbaum & Sass, 2008]:

- Das Testgerät soll möglichst einfach aufgebaut sein.
- Das Testverfahren soll möglichst einfach und schnell durchführbar sein.
- Der Adhäsionstest soll in geotechnischen Standardlaboratorien reproduzierbar sein.
- Das Testgerät soll ggf. auch unter Baustellenbedingungen einsetzbar sein.
- Es sollen standardisierte Verfahren zur Aufbereitung der Böden verwendet werden.
- Es sollte einen Bezug zu bodenmechanischen Standardkennwerten hergestellt werden.

Weiterhin sollen bodenphysikalische Zusammenhänge herausgearbeitet werden. Diese sollen als Grundlage zur Klassifizierung des Verklebungspotenzials adhäsiver Böden dienen. Weiterhin sollen damit Empfehlungen zur Planung von maschinellen Vortrieben abgeleitet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Adhäsionsmessverfahren entwickelt. Grundlage hierfür lieferte die Arbeit von Thewes [1999]. Aus den Ergebnissen wurde ein bodenphysikalisches Modell abgeleitet.

Das Versuchsverfahren wird in Kap. 6 beschrieben. Die Anwendbarkeit des Versuchsgerätes und des –verfahrens wird durch Adhäsionsversuche an Versuchstonen (Kap. 7) dargestellt (Kap. 8). Die Ergebnisse der Adhäsionsversuche (Kap. 8 und Kap. 9) stellen die Grundlage für die Ableitung eines allgemeingültigen, bodenphysikalischen Modells dar (Kap. 10). Anhand dieses Modells werden sowohl die eigenen Versuchsergebnisse als auch die Ergebnisse früherer Forschungsarbeiten qualitativ erklärt (Kap. 11). Daraus werden dann Hinweise für die Planung von Tunnelvortrieben abgeleitet (Kap. 12).

2 Adhäsion

2.1 Definition der Begriffe Adhäsion und Kohäsion

Der Begriff Adhäsion leitet sich aus dem lateinischen Wort *adhaerere* (anhaften) ab. Als Adhäsion werden im physikalischen Sinne die Anziehung bzw. die Anziehungskräfte zwischen den Molekülen zweier verschiedener Stoffe bezeichnet. Adhäsionskräfte können zwischen festen Körpern, festen Körpern und Flüssigkeiten bzw. Gasen auftreten [Hering et al., 1989]. Im bodenphysikalischen Sinne ist daher das Anhaften von Boden an Werkstoffoberflächen auf Adhäsion zurückzuführen. Im Gegensatz dazu wird als Kohäsion die Zusammenhangskraft zwischen gleichartigen Molekülen (oder Atomen) bzw. Stoffen definiert [Hering et al., 1989].

In diesem Sinne wird als Kohäsion eines Bodens der innere Zusammenhang zwischen den Bestandteilen eines Bodens, also das gegenseitige Anhaften von Bodenteilchen verstanden. Diese Definition hat sich in der Bodenmechanik etabliert, da „der Boden“ in diesem Fachgebiet als einheitlicher Stoff angesehen wird. Sie ist im streng physikalischen Sinne jedoch meist unzutreffend, da ein Boden in der Regel aus vielen verschiedenen mineralischen oder auch organischen Stoffen zusammengesetzt ist. Daher handelt es sich bei dem bodenmechanischen Begriff Kohäsion streng genommen um Kräfte, die sowohl auf Kohäsion von Bodenteilchen gleicher als auch auf Adhäsion von Bodenteilchen unterschiedlicher mineralischer Zusammensetzung zurückzuführen sind. Sowohl bei Adhäsion wie auch bei der Kohäsion handelt es sich um Grenzflächeneffekte [Hering et al. 1989].

Da ein Anhaften von Boden an Werkstoffoberflächen makroskopisch nur dann bemerkbar ist, wenn mehrere Bodenteilchen zusammen anhaften, ist Adhäsion nur dann von Bedeutung, wenn der Boden kohäsiv ist. Diese Voraussetzung ist im Regelfall nur bei bindigen Böden gegeben.

2.2 Industrielle Anwendungen von Adhäsionskräften

Wirtschaftlich spielen Adhäsionskräfte seit langem eine bedeutende Rolle bei dauerhaften, mechanisch und hydraulisch belastbaren Verbindungen von Werkstoffen. Bereits in der Steinzeit wurden steinerne Werkzeugteile oder Pfeilspitzen mit Baumharzen mit den Werkzeugträgern verbunden [Koller et al., 2001].

In heutiger Zeit ist die Nutzung von Adhäsionseffekten wesentlicher Bestandteil industrieller Fertigung, *„da es praktisch keinen Industriezweig gibt, in dem das Kleben (also die Nutzung von Adhäsionskräften) nicht in irgendeiner Form angewendet wird. Mittlerweile werden häufig traditionelle Verbindungstechniken wie Schweißen oder Schrauben durch Kleben ersetzt. So werden beispielsweise in der Luftfahrt geklebte Faserverbundwerkstoffe eingesetzt“* [Habenicht,

2006]. Aber auch in der Bauindustrie spielen Adhäsionskräfte eine bedeutende Rolle, so z.B. in der Straßenbautechnik beim Anhaften von Bitumen an Gesteinen, in der konstruktiven Nutzung von Kunststoffen oder Glas oder bei Kunststoffdichtungsbahnen.

In der Klebstoffindustrie existieren weite Forschungsfelder, die die Adhäsionskräfte zwischen verschiedensten Materialien diskutieren und neue Klebemittel für den kraftschlüssigen Verbund zweier Werkstoffe kreieren. Habenicht [2006] führt dazu aus, dass *„über die Gesetzmäßigkeiten der Haftung von Klebschichten an den Füge-teiloberflächen in der Literatur außerordentlich viele theoretische und experimentelle Arbeiten existieren. Grundlage dieser Arbeiten ist schwerpunktmäßig die Festigkeit adhäsiver Bindungen aufgrund der beteiligten Bindungsmechanismen zu berechnen und sie ergänzend messtechnisch zu erfassen. Die Ergebnisse aller Arbeiten weisen aus, dass es keine universell anwendbare Adhäsionstheorie, die sämtliche bisher ermittelten Erkenntnisse einbezieht und berücksichtigt, gibt und wegen der Komplexität aller zusammenwirkenden Faktoren auch nicht geben kann.“*

2.3 Messung von Adhäsionskräften

Als Adhäsionskraft wird i.A. die Kraft definiert, die erforderlich ist, die beiden adhärierenden Stoffe voneinander zu trennen. Es können in Anlehnung an Prüfverfahren für Klebungen zusammenfassend drei wesentliche Trennprinzipien unterschieden werden [in Anlehnung an Habenicht, 2006]:

- das schälende Trennprinzip,
- das scherende bzw. schiebende Trennprinzip,
- das ziehende Trennprinzip.

Die Prinzipien sind in einer Skizze dargestellt (Abbildung 2.1).

Bei einer schälenden Trennung der beiden Stoffe wird entweder ein Stoff abgezogen oder die beiden Stoffe mit einem Trennwerkzeug (z.B. Messer) getrennt. Dieser Mechanismus ist von Bedeutung beim Lösen von bindigen - also kohäsiven - Böden im Erdbau oder bei der Reinigung von Grabgefäßen für den Erdbau von Bedeutung. Da hier Kräfte wirken, die parallel zur Oberfläche der Werkstoffe wirken, sind auch Scherkräfte am Trennvorgang beteiligt, so dass eine isolierte Betrachtung von Adhäsionskräften schwierig ist.

Bei dem scherenden Trennprinzip werden die Stoffe durch Kräfte getrennt, die parallel zur Oberfläche wirken. In der Bodenmechanik ist dieses Prinzip beispielsweise bei der Säuberung von Grabgefäßen oder beim Ziehen von Geräten oder Spundwänden aus dem Boden von

Bedeutung. Die Trennkraft wird in der Literatur auch als tangential Adhäsion bezeichnet [Beretitsch, 1992; Schlick, 1989; Thewes, 1999]. Dabei werden aber die Adhäsionskräfte durch adhäsionsunabhängige Reibungskräfte überlagert, so dass eine isolierte Messung einer tangentialen Adhäsion schwierig ist. Der physikalische Zusammenhang ist in Kap. 11 beschrieben.

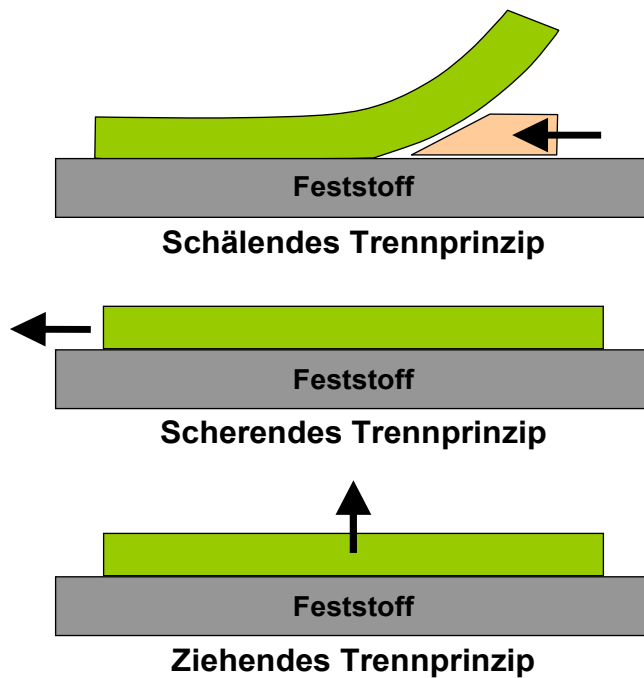


Abbildung 2.1: Trennprinzipien, in Anlehnung an Habenicht [2006]

Bei einem ziehenden Trennprinzip werden die Stoffe durch Kräfte getrennt, die normal zur haftenden Oberfläche wirken. Dies wird als normale Adhäsion bezeichnet. Die in der Grenzfläche zwischen beiden Stoffen auftretenden Adhäsionskräfte können bei diesem Trennvorgang direkt interpretiert werden. Aus diesem Grund erscheint für die vorliegende bodenmechanische Fragestellung eine Versuchsanordnung, die diesem Trennprinzip folgt, am besten für Messungen von Adhäsionskräften geeignet. Eine entsprechende Empfehlung gibt auch [Thewes, 1999].

Problematisch sind beim ziehenden Trennprinzip allerdings Brüche, die nicht in der Fuge zwischen den Stoffen, sondern in einem der beiden Stoffe - ggf. auch lokal - stattfinden, da dann dort die Adhäsion größer ist als die Zugfestigkeit des gebrochenen Stoffes. Daher ist bei Versuchen, welche die normale Adhäsion durch Abziehen eines der Stoffe messen, unbedingt die Oberfläche nach dem Abziehen zu prüfen: Haften an der Oberfläche noch Reste des abgezogenen Stoffes an, so sind die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte bzw. die Zugfestigkeit des abgezogenen Stoffes. Ob an der Oberfläche noch Stoffe anhaften, lässt sich visuell leicht prüfen.

2.4 Haftmechanismen

Es wird - außer formschlüssigen Verbindungen - zwischen zwei maßgebenden Arten von Haftmechanismen unterschieden, der Haftung ohne und der Haftung mit Materialbrücken zwischen den Haftpartnern (Kap. 5.1.5).

Bei der Haftung ohne Materialbrücken resultiert die Haftung aus der elektrostatischen Anziehung der Haftpartner infolge von Valenzbindungen, elektrostatischer Aufladung und von van-der-Waals Kräften. Dazu müssen die Abstände der Haftpartner vergleichsweise klein werden. Als oberen Grenzabstand für den Einfluss von van-der-Waals-Kräften gibt Rumpf [1958] 10 nm an.

Bei der Haftung mit einer Materialbrücke werden wiederum zwei Gruppen unterschieden: Die Haftung mit einer Flüssigkeits- und die Haftung mit einer Festkörperbrücke. Bei der Haftung mit einer Flüssigkeitsbrücke wiederum wird einerseits zwischen der Anziehung aufgrund der Grenzflächenkräfte und des Kapillardrucks an frei beweglichen Flüssigkeitsoberflächen sowie aufgrund der Adhäsions- und Kohäsionskräfte in nicht frei beweglichen Bindemittelbrücken andererseits unterschieden. Zu der Haftung infolge der Adhäsions- und Kohäsionskräfte in nicht frei beweglichen Bindemittelbrücken zählen zähflüssige Bindemittel, Klebstoffe und Adsorptionsschichten genügender Dicke. Als oberen Grenzabstand für den Einfluss von Adsorptionskräften gibt Rumpf [1958] 3 nm an.

Zu den Haftungsmechanismen mit einer Festkörperbrücke zählen Sinterung, Rekristallisation, Kornwachstum, chemische Reaktionen der Haftpartner, Schmelzhaftung, erhärtende Bindemittel und die Kristallisation von in der Kontaktflüssigkeit gelösten Stoffen. Eine Übersicht der Haftmechanismen in gasförmiger Atmosphäre ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Haftmechanismen			
Ohne Materialbrücke		Mit Materialbrücke	
		Flüssigkeitsbrücke	Festkörperbrücke
<ul style="list-style-type: none"> • Elektrostatische Anziehung • van-der-Waals-Kräfte • Valenzbindungen 		Frei bewegliche Flüssigkeitsoberflächen <ul style="list-style-type: none"> • Kapillarkräfte • Grenzflächenkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> • Sinterung • Rekristallisation • Kornwachstum • Chemische Reaktion der Haftpartner • Schmelzhaftung, • Erhärtende Bindemittel • Kristallisation von in der Kontaktflüssigkeit gelösten Stoffen
		Nicht frei bewegliche Bindemittelbrücken <ul style="list-style-type: none"> • Zähflüssige Bindemittel • Klebstoffe • Adsorptionsschichten 	

Abbildung 2.2: Haftmechanismen [in Anlehnung an Rumpf, 1958]

2.5 Maßgebender Haftmechanismus

2.5.1 Diskussion der Haftmechanismen

Bei dem Anhaften von Tonen an Werkstoffoberflächen für tunnelbauliche Fragestellungen können zähflüssige Bindemittel und Klebstoffe als Haftmechanismus offensichtlich ausgeschlossen werden. Festkörperbrücken durch Rekristallisation, Kornwachstum, Schmelzhaftung und erhärtende Bindemittel können ebenfalls offensichtlich ausgeschlossen werden.

Die Haftung über Festkörperbrücken durch chemische Reaktionen der Haftpartner sowie Kristallisation von in der Kontaktflüssigkeit gelösten Stoffen ist bei Kontakt von Stahl (bzw. Eisen) theoretisch möglich, jedoch benötigen die Prozesse hierfür mindestens einige Tage. Bei z.B. Monate oder Jahre im Boden belassenen Stahlträgern oder Spundwänden können solche Prozesse beobachtet werden. Für tunnelbauliche Fragestellungen kann dieser Haftmechanismus aber auch ausgeschlossen werden, da sich die Tunnelvortriebsmaschine und die Bodenpartikel i.A. nicht die für die erforderlichen Prozesszeiten benötigte Dauer in Ruhe befinden.

Für das Vorliegen einer Haftung ohne Materialbrücke darf sich zwischen den Haftpartnern kein dritter Stoff, z.B. Wasser, befinden. Dies kann für tunnelbauliche Fragestellungen in der Regel ausgeschlossen werden, da an der Oberfläche der Mineralkörner fast immer mindestens eine Schicht aus Wassermolekülen adsorbiert ist. Außerdem ist bei den hier betrachteten Vortrieben in der Regel immer einer flüssige Phase für die Stützung der Ortsbrust vorhanden, so dass dadurch immer eine frei bewegliche Materialbrücke vorhanden ist.

Daher kommt für das Auftreten von Anhaftungen von Tonen an Werkstoffoberflächen für tunnelvortriebstechnische Fragestellungen nur die Haftung mit einer Materialbrücke aufgrund der Grenzflächenkräfte und des Kapillardrucks an frei beweglichen Flüssigkeitsoberflächen oder aufgrund von Adsorptionsschichten in nicht frei beweglichen Materialbrücken in Frage. Dies wird im Folgenden diskutiert.

2.5.2 Adsorption bei Mineralkörnern

Die Oberflächen von Mineralkörnern sind infolge der Dissoziation von Protonen der OH^- besetzten Oberfläche i.A. negativ geladen und können Kationen binden. Die Stärke dieser Ladung ist meist variabel und hängt vom pH-Wert und der Elektrolytkonzentration der Umgebungslösung ab [Scheffer & Schachtschnabel, 1998], wobei die Ladung bei den meisten Mineralkörnern in natürlichen Umgebungsbedingungen aber vergleichsweise schwach ist. Bei

Tonmineralen dagegen sind die Oberflächen permanent und pH-Wert unabhängig geladen (Anhang A). Aufgrund des Dipolcharakters des Wassermoleküls können diese an den geladenen Oberflächen von Mineralkörnern adsorbiert werden. Diese wird nach der Theorie von Gouy - Chapman in zwei Bereiche unterteilt [Schick, 2003; Scheffer & Schachtschnabel, 1998; Koorevaar et al., 1983]:

1. Eine innere Schicht, die einer Lage von Kationen entspricht. Diese Schicht wird als Sternschicht [Stern, 1924] bezeichnet. Die Dicke dieser Schicht beträgt 0,5 – 0,6 nm [Schick, 2003]. Die Bindungsspannung dieser Schicht an der Oberfläche wird mit ca. 600 MPa angegeben [Scheffer & Schachtschnabel, 1998] und ist daher außerordentlich fest. An diese Kationen werden Wassermoleküle infolge ihres Dipolcharakters angelagert. Dies wird als Hydratation der Kationen bezeichnet, wobei Scheffer & Schachtschnabel [1998] vermuten, dass die Kationen zumindest teilweise auch dehydratisiert vorliegen.
2. Eine äußere Schicht, die aufgrund der thermischen Bewegung der Ionen entsteht und die dicker als eine Ionenlage ist. Diese Schicht wird nach Gouy [1910] als Gouy-Schicht bezeichnet. Die äußere Grenze dieser Schicht ist durch die Konzentration der Ionen gegeben und daher nicht eindeutig definiert, d.h. diffus, so dass zusammen mit der Sternschicht eine diffuse Ionenschicht entsteht [Lagaly et al., 1997]. In dieser diffusen Schicht werden ebenfalls Wassermoleküle an Kationen gebunden, d.h. auch diese Kationen sind hydratisiert. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche nimmt das Bindevermögen der Kationen ab. Dort liegen dann nicht hydratisierte neben nicht hydratisierten Kationen vor. In diesem Bereich nimmt auch die Konzentration der Anionen zu. Ab einem bestimmten Abstand ist die Konzentration der Kationen und der Anionen ausgeglichen. Die Dicke der diffusen Schicht ist außer von der Schichtladung der Mineralkornoberfläche von der Elektrolytkonzentration der Umgebungslösung abhängig [Jasmund & Lagaly, 1993].

Diese diffuse Ionenschicht wird zusammen mit der negativ geladenen Oberfläche als diffuse Doppelschicht bezeichnet (Abbildung 2.3). In der diffusen Ionenschicht, insbesondere direkt an den negativ geladenen Oberflächen sind die Kationen sehr hoch konzentriert, d.h. ihre Dichte ist sehr hoch, weshalb diese Schicht sehr fest ist. Die an die Kationen angelagerten Wassermoleküle liegen dort nicht mehr in flüssiger, sondern in fester, eisähnlicher Form vor. Bei größerer Entfernung von der Oberfläche nimmt die Konzentration der Kationen ab, so dass die Wassermoleküle zwar noch gebunden sind, aber wieder in Wasserform vorliegen. Bei noch größerer Entfernung sind die Wassermoleküle nicht mehr gebunden, sie liegen als frei bewegliches Wasser vor (Abbildung 2.4). Kézdi [1969] gibt auf der Grundlage des Spannungszustandes des Wassers einen oberen Grenzwert von 0,5 μm für den Abstand von

der geladenen Oberfläche eines Festkörpers, ab der Wasser wieder in flüssiger Form vorliegt (Abbildung 2.4). Dieser Grenzwert kann als äußerster Grenzwert für die Dicke der diffusen Doppelschicht interpretiert werden. Allerdings gibt Schick [2003] Messwerte für die Dicke der Adsorptionsschicht von 2,5 – 3,2 nm für Tone an und hält Werte von 2 – 5 nm für plausibel.

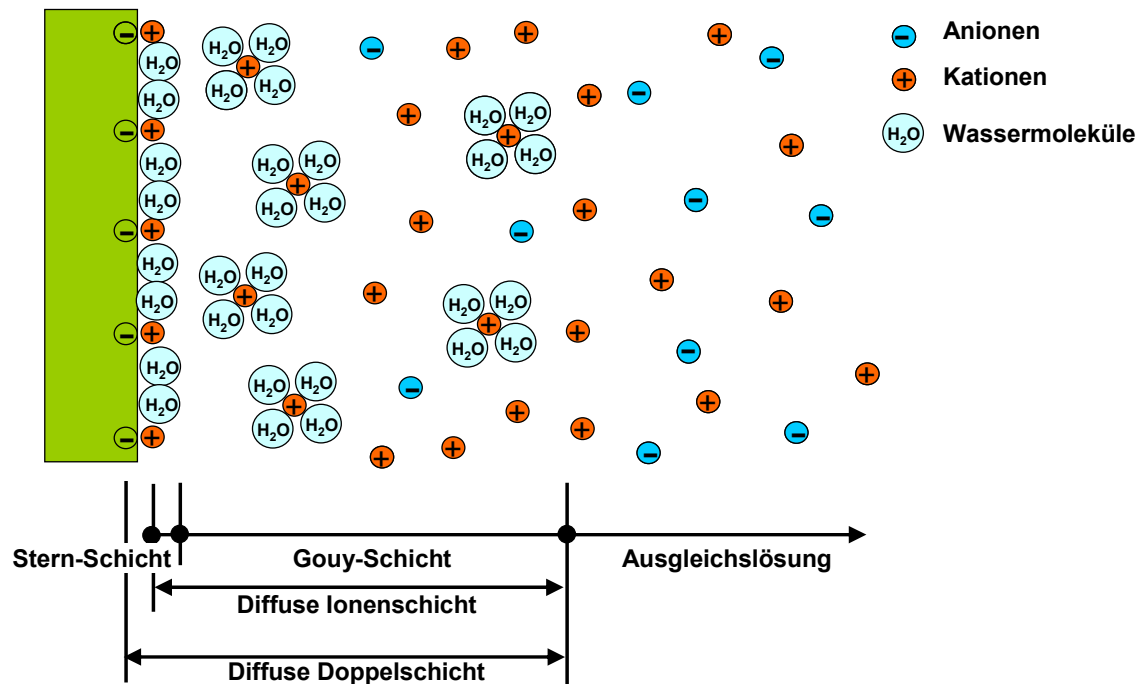


Abbildung 2.3: Diffuse Doppelschicht [in Anlehnung an Scheffer & Schachtschnabel, 1998]

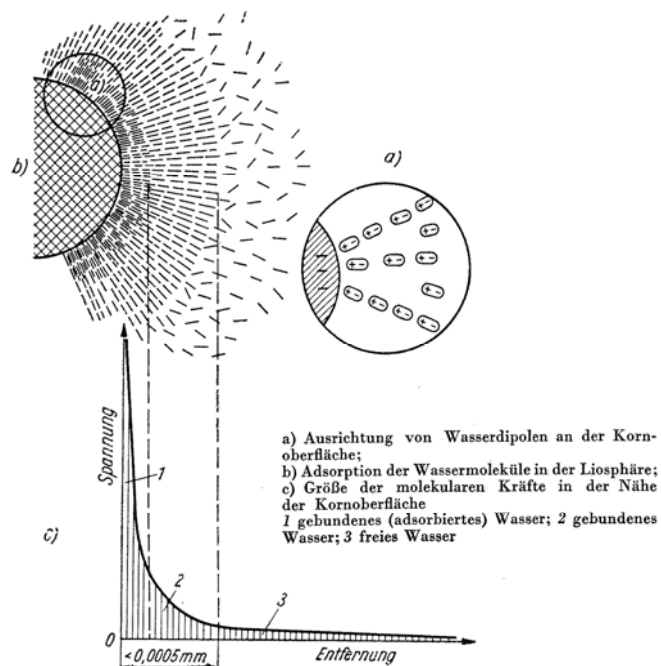


Abbildung 2.4: Modell für die Bindung von Wassermolekülen an einer geladenen Feststoffoberfläche [verändert nach Kézdi, 1969]

Kommen nun zwei potenzielle Haftpartner (z.B. zwei Bodenpartikel oder ein Bodenpartikel und eine Werkstoffoberfläche) so nah zusammen, dass sich die Bindekräfte in den jeweiligen Adsorptionsschichten überlagern, können sich die Haftpartner gegenseitig anziehen. Sind die Bodenpartikel hinreichend klein, so dass die Eigengewichtskräfte der Bodenkörner vernachlässigbar gegenüber den Adsorptionskräften sind, so kommt es zu sehr festen Bindungen zwischen diesen Haftpartnern.

2.5.3 Kapillarkräfte als maßgebender Haftmechanismus

In der Grenzfläche zwischen dem Ton und der Werkstoffoberfläche ist bei Tunnelvortrieben immer ein Flüssigkeitsfilm vorhanden (Kap. 3). Mit den Ausführungen in Kapitel 3 kann die Dicke dieses Flüssigkeitsfilmes für die in den Versuchen gemessenen Adhäsionsspannungen (zwischen ca. 2 kN/m² und ca. 40 kN/m², Kap. 8) berechnet werden. Sie beträgt wenige Mikrometer (Abbildung 2.5). Der Abstand zwischen der Tonoberfläche und der Werkstoffoberfläche ist damit wesentlich größer die von Kézdi mit 0,5 µm angegebene Dicke der Adsorptionsschicht. Thewes [1999] misst bei einem einzelnen Adhäsionsversuch eine vergleichsweise sehr hohe Adhäsionsspannung von 208 kN/m². Selbst hierfür beträgt die Dicke des Flüssigkeitsfilmes noch $d \approx 0,6 \mu\text{m}$. Für die vorliegenden Fragestellungen kann die Adhäsion daher vollständig durch den Kapillardruck und die Grenzflächenkräfte an einer frei beweglichen Flüssigkeitsoberfläche des in der Grenzfläche vorhandenen Flüssigkeitsfilmes erklärt werden.

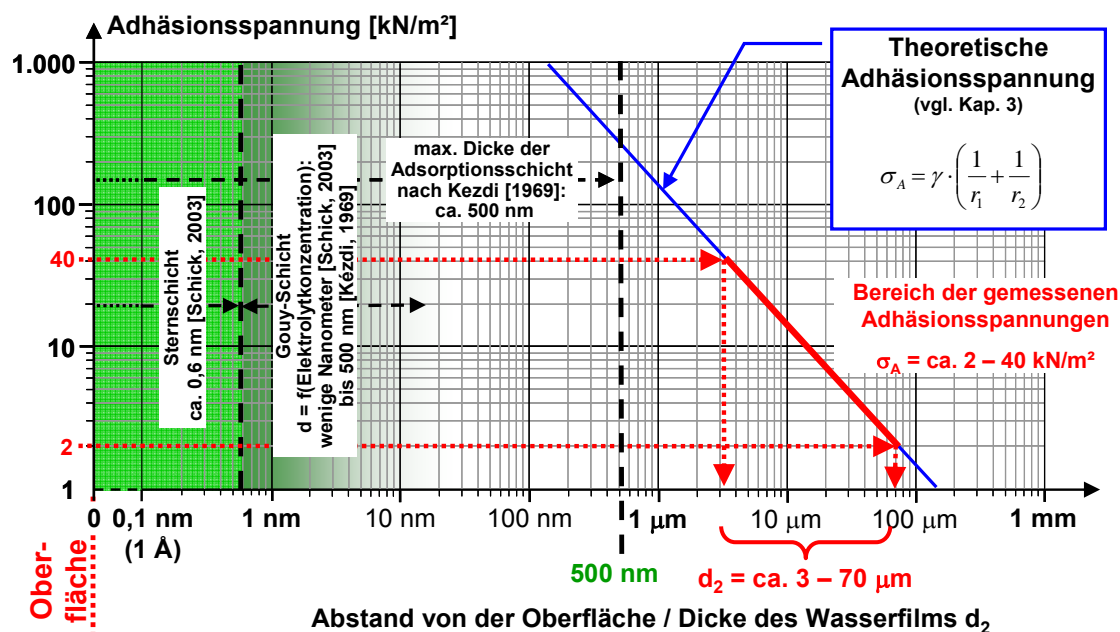


Abbildung 2.5: Dicke des Wasserfilms für gemessene Adhäsionsspannungen, Grenzabstände für Haftmechanismen ohne Materialbrücken

Kapillarkräfte als Ursache für die Adhäsion von Böden werden u.a. auch von Thewes [1999 und 2003], Hollinderbäumer & Hoberg [1994], Schütz [1979] Schubert [1972], [Rumpf, 1958], Fountaine [1954], genannt.

3 Adhäsionsmodell

3.1 Voraussetzung für Kapillarkräfte

Wie in Kapitel 2.5 ausgeführt, kommen von den möglichen Haftmechanismen für Tunnelvortriebe nur die Kapillarkräfte und Randkräfte in Betracht. Der für das Auftreten von Kapillarkräften und Randkräften notwendige Flüssigkeitsfilm in der Grenzfläche zwischen Boden und Werkstoffoberfläche ist bei Tunnelvortrieben in der Regel immer vorhanden:

- Der Boden selber weist im natürlichen Zustand einen mehr oder weniger hohen Wassergehalt auf. Wie die Adhäsionsversuche ohne zusätzliche Bewässerung zeigen, kann der eigene Wassergehalt eines bindigen Bodens ausreichen, um diesem Flüssigkeitsfilm zu erzeugen (Kap. 8.4.5).
- Die gelösten Teile der Tonböden („Chips“) sind bei einem Vortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust immer mit der Stützflüssigkeit umgeben, da diese auch den Transport des gelösten Bodens übernimmt.
- Bei einem Vortrieb mit erddruckgestützter Ortsbrust wird der Boden verbreit, um die für die Stützfunktion erforderliche Konsistenz zu erzeugen.

3.2 Versuche zur Messung der Adhäsion zwischen Stahloberflächen

Um die Adhäsion an einer Werkstoffoberfläche ohne den aus einem Boden resultierenden Einfluss zu untersuchen wurden fünf Versuche durchgeführt, bei denen die Adhäsion zwischen zwei stählernen Adhäsionstestzylinder mit gleichen Oberflächeneigenschaften gemessen wurde. Hierfür wurden Adhäsionstestzylinder mit feinpolierter Oberfläche ($R_z = 0,1 \mu\text{m}$, Kap. 6.2) gewählt. Zum Ausgleich von geringen Imperfektionen bzgl. der Parallelität der Oberflächen wurde ein Tuch unter den unteren Zylinder gelegt.

Die Adhäsionstestzylinder wurden aufeinandergedrückt, nachdem auf die Oberfläche des unteren Adhäsionstestzylinders entionisiertes Wasser gegeben wurde. Dadurch war ein geschlossener Wasserfilm zwischen beiden Adhäsionstestzylindern vorhanden (Abbildung 3.1, linkes Bild). Dieser Wasserfilm wurde durch das Aufeinanderdrücken der Adhäsionstestzylinder bis auf einen Rest ausgepresst. Dieser Rest verblieb nach der Trennung der Adhäsionstestzylinder auf der Oberfläche (Abbildung 3.1, rechtes Bild).

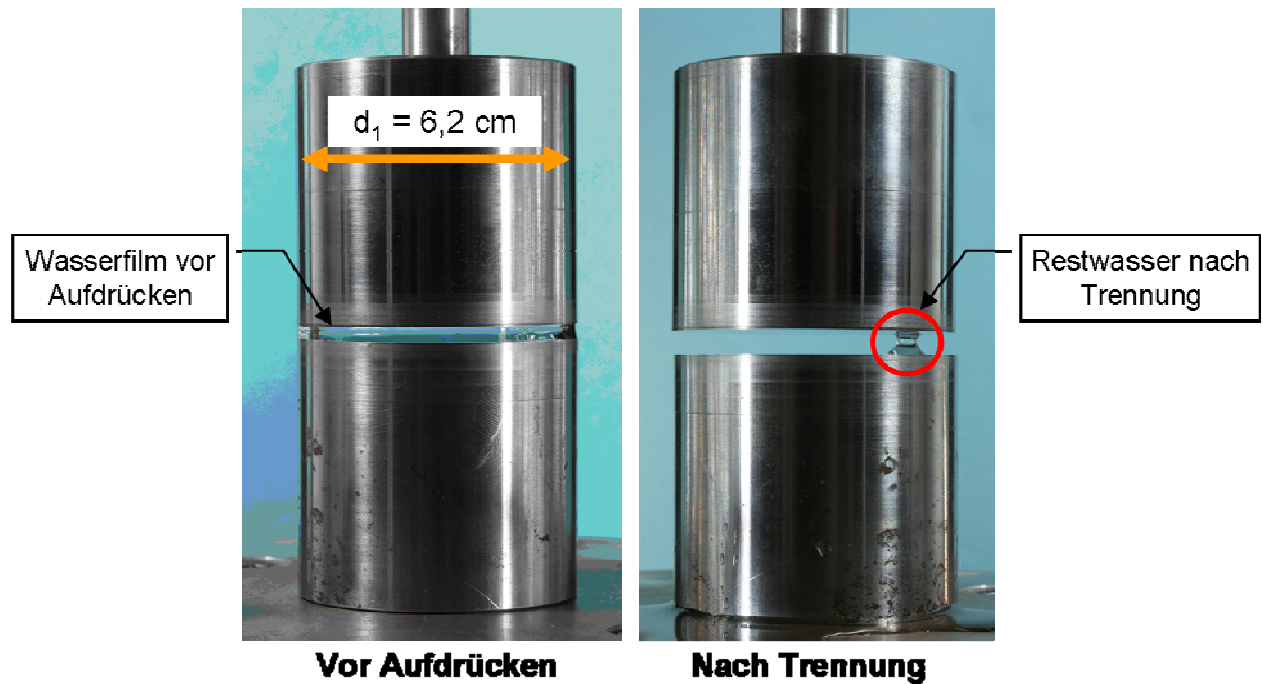


Abbildung 3.1: Adhäsionsversuch an Adhäsionstestzylindern

Das Volumen dieser Restwassermenge V_{Rest} wurde bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Die mittlere Restwassermenge betrug $V_{\text{Rest}} = 0,09 \text{ ml}$.

Tabelle 3.1 Restwassermengen

Messung	Restwassermenge V_{Rest} [ml]
1	0,097
2	0,087
3	Nicht bestimmt
4	0,082
5	0,093
Mittelwert	0,090
Standardabweichung s	0,007

Die Adhäsionsspannung zwischen den Adhäsionstestzylindern betrug i.M. $5,1 \text{ kN/m}^2$ bei einer Standardabweichung von $0,13 \text{ kN/m}^2$ (Abbildung 3.2). Bis auf einen Versuch (Messung 3) sind die Zeit-Spannungs-Verläufe der Versuche qualitativ und quantitativ sehr gleichmäßig. Die Messung 3 Versuch (gepunktete Linie) zeigt qualitativ eine deutliche Abweichung. Bei diesem Versuch wurde kein ein Tuch unter den unteren Zylinder gelegt. Die Abweichung der Messkurve wird hierauf zurückgeführt.

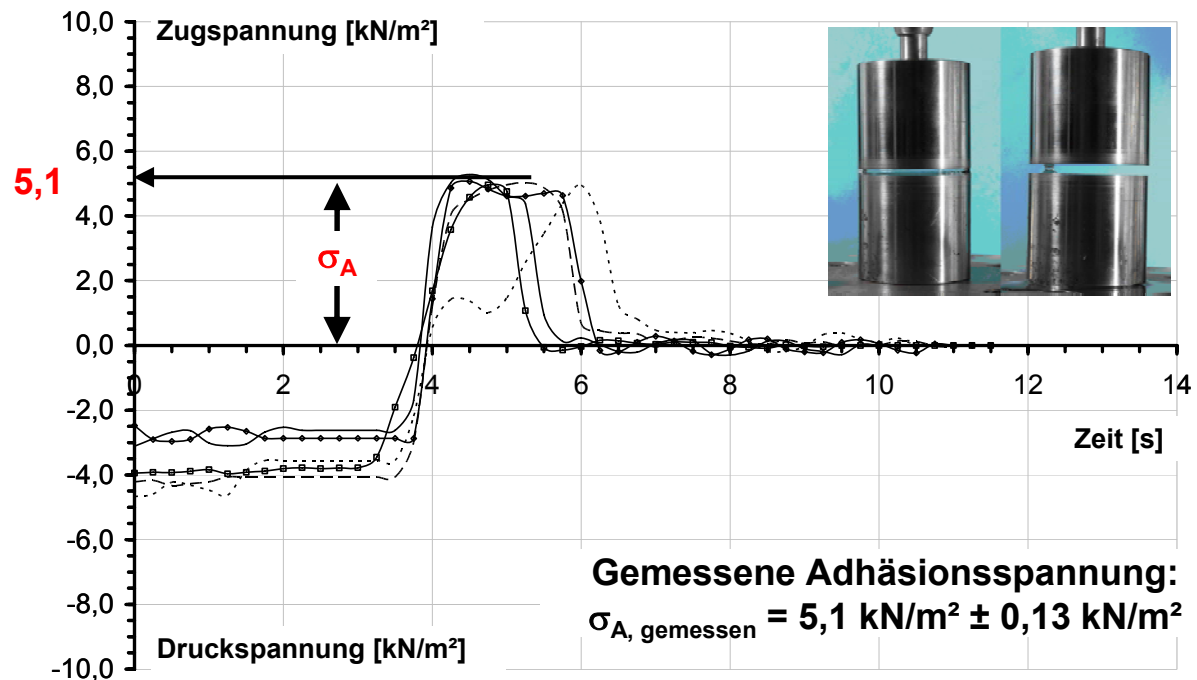


Abbildung 3.2: Ergebnisse Adhäsionsversuch an Adhäsionstestzylindern

3.3 Kapillarmodell für Festkörperoberflächen

Die Adhäsionskräfte zwischen den Stahloberflächen können mit den Ausführungen von [Rumpf, 1958], [Pietsch & Rumpf, 1967], [Schubert, 1972], [Rumpf, 1974] und [Rumpf & Schubert, 1978], und [Schütz, 1979], sowie [Habenicht, 2006] erklärt werden (siehe Kap. 5).

Betrachtet wird der Gleichgewichtszustand zwischen zwei, durch eine Flüssigkeitsbrücke adhäsiv verbundenen, kreisrunden Festkörperoberflächen mit dem Durchmesser d_1 unter Einwirkung einer äußeren Zugkraft F_{Ges} (Abbildung 3.3). Diese Flüssigkeitsbrücke wird als Kapillare angesehen. Dies entspricht der in Kap. 3.2 beschriebenen Versuchsanordnung. In der Betrachtung werden Gravitationskräfte vernachlässigt.

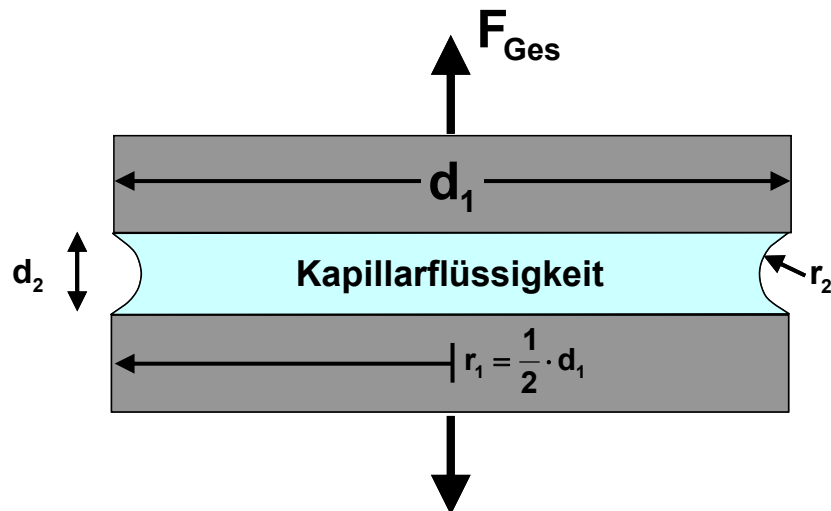


Abbildung 3.3: Kapillarmodell für Festkörperoberflächen

Im Grenzzustand des Gleichgewichts, d.h. unmittelbar vor der Trennung, muss der Betrag der äußeren Zugkraft F_{Ges} gleich dem Betrag der inneren Kraft F_I sein (Gleichung 3.1).

$$F_{\text{Ges}} = F_I \quad (\text{Gln. 3.1})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
F_{Ges}	: Äußere Zugkraft	Kraft	[kN]
F_I	: Innere Zugkraft	Kraft	[kN]

Die innere Kraft F_I setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der Kapillarkraft F_K und der Randkraft F_R (Gleichung 3.2).

$$F_I = F_K + F_R \quad (\text{Gln. 3.2})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
F_K	: Kapillarkraft	Kraft	[kN]
F_R	: Randkraft	Kraft	[kN]

Für die Betrachtung der Kapillarkräfte wird das in Abbildung 3.4 dargestellte System angesetzt. Der Kapillardruck p_K ist definiert als die Differenz Δp zwischen dem Umgebungsdruck p_A und dem Flüssigkeitsdruck p_{FI} .

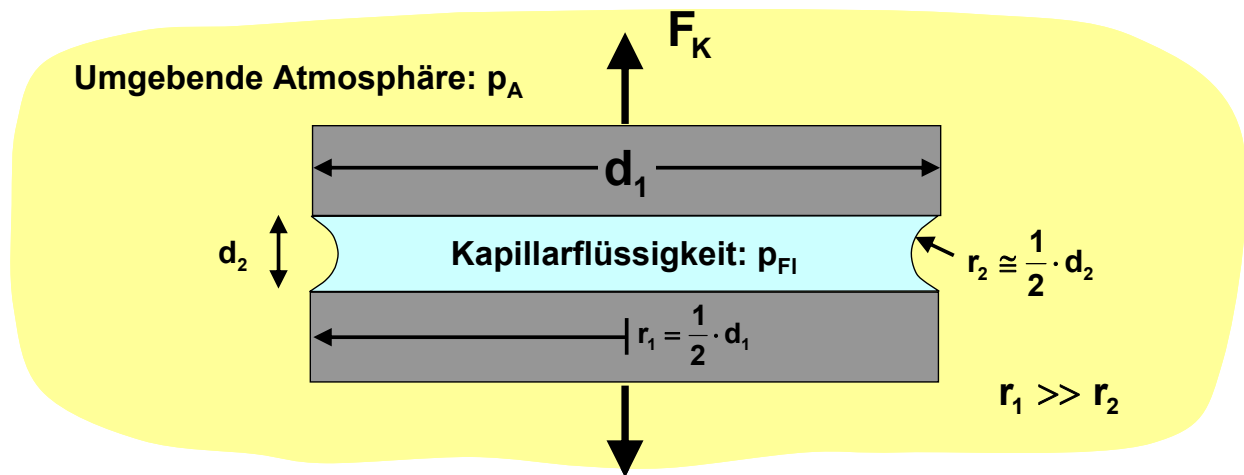


Abbildung 3.4: Kapillarkraftmodell

Der Kapillardruck wird mathematisch i.A. mit der Gln. 3.3 beschrieben [Rumpf, 1958], [Pietsch & Rumpf, 1967], [Schubert, 1972], [Rumpf, 1974], [Rumpf & Schubert, 1978], [Schütz, 1979] und [Habenicht, 2006]. Diese wird in manchen dieser Quellen auch als Laplace-Gleichung bezeichnet.

$$p_K = \Delta p = p_A - p_{Fl} = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Gln. 3.3})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
p_K	: Kapillardruck	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
Δp	: Druckunterschied	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
p_A	: Druck in der umgebenden Atmosphäre	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
p_{Fl}	: Flüssigkeitsdruck	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
γ	: Oberflächenspannung der Kapillarflüssigkeit	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
r_1	: Radius der Festkörper	Länge	[m]
r_2	: Radius des Meniskus der Kapillarflüssigkeit	Länge	[m]

Der Radius des Meniskus der Kapillarflüssigkeit r_2 darf nach Habenicht [2006] für Abmessungen des Radius der Festkörper r_1 , die um ein Vielfaches größer sind ($r_1 \gg r_2$), näherungsweise dem halben Abstand der Festkörperoberflächen d_2 gleichgesetzt werden (Gleichung 3.4).

$$r_2 \cong \frac{1}{2} \cdot d_2 \quad (\text{Gln. 3.4})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
d_2	: Abstand der Festkörperoberflächen	Länge	[m]

Die aus dem Kapillardruck p_K resultierende Kapillarkraft F_K wird durch Multiplikation mit der Querschnittsfläche der Kapillarflüssigkeit in der Mittelebene der Grenzfläche zwischen den Festkörperoberflächen (Gleichung 3.5) berechnet. Dabei kann auch hier wieder aufgrund des großen Unterschiedes zwischen r_1 und r_2 der Radius der Querschnittsfläche der Kapillare dem Radius der Festkörper gleichgesetzt werden.

$$F_K = p_K \cdot \pi \cdot r_1^2 = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot \pi \cdot r_1^2 \quad (\text{Gln. 3.5})$$

Die Randkraft F_R resultiert aus der Oberflächenspannung des Fluides in gasförmiger Umgebung bei Benetzung einer Feststoffoberfläche. Es wirken die Oberflächenspannungen zwischen gasförmiger und fester Phase, zwischen gasförmiger und flüssiger Phase und zwischen flüssiger und fester Phase. Der Winkel δ zwischen der festen Phase und der Flüssigkeitsoberfläche ist der Randwinkel (Abbildung 3.5). Dieser ist abhängig von der Benetzung der Festkörperoberfläche, also von der Oberflächenspannung des Fluides und dem Material und der Beschaffenheit des Feststoffes.

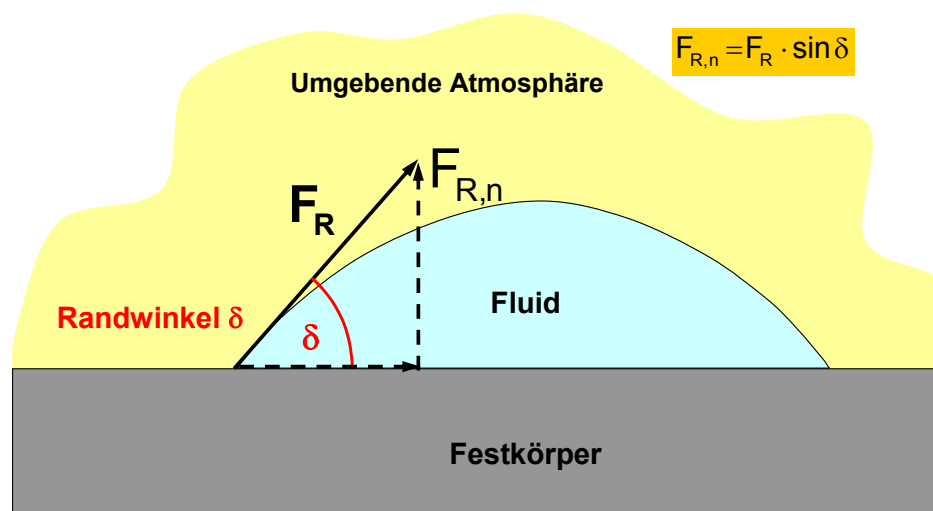


Abbildung 3.5: Randwinkel

Zur Berechnung der Randkraft wird das in Abbildung 3.6 dargestellte System verwendet. Entsprechend des von den Benetzungseigenschaften der Festkörperoberfläche und der Flüssigkeit abhängigen Randwinkels δ stellt sich eine aufgrund der Oberflächenspannung des Fluides wirkende Randkraft F_R ein.

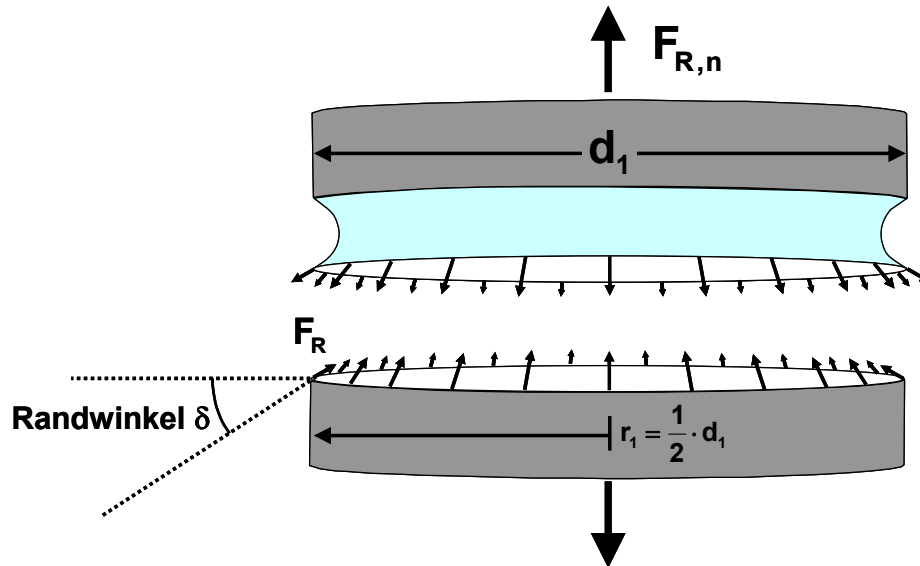


Abbildung 3.6: Randkraftmodell

Die Randkraft F_R kann ebenfalls nach den Ausführungen von [Rumpf, 1958, Pietsch & Rumpf, 1967, Schütz, 1979] berechnet werden (Gleichung 3.6).

$$F_R = U \cdot \gamma = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \gamma \quad (\text{Gln. 3.6})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
U	: Länge des Umfanges der Kapillarflüssigkeit	Länge	[m]

Die der äußeren Zugkraft entgegengewirkende, normal zur Festkörperoberfläche wirkende Komponente $F_{R,n}$ der Randkraft errechnet sich durch Multiplikation mit dem Sinus des Randwinkels δ (Gleichung 3.7).

$$F_{R,n} = F_R \cdot \sin \delta = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \gamma \cdot \sin \delta \quad (\text{Gln. 3.7})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
δ	: Randwinkel	Bogenmaß	[-]

Durch Einsetzen von Gleichung 3.2 in Gleichung 3.1 sowie der Gleichungen 3.5 und 3.7 in Gleichung 3.2 ergibt sich für die äußere Zugkraft F_{Ges} der Ausdruck nach Gleichung 3.8.

$$F_{\text{Ges}} = F_K + F_{R,n} = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot \pi \cdot r_1^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \gamma \cdot \sin \delta \quad (\text{Gln. 3.8})$$

Für große Unterschiede der Radien r_1 und r_2 mit $r_1 \gg r_2$ verhalten sich die Größen der reziproken Werte der Radien umgekehrt zueinander (Gleichung 3.9).

$$r_1 \gg r_2 \Rightarrow \frac{1}{r_2} \gg \frac{1}{r_1} \quad (\text{Gln. 3.9})$$

Weiterhin folgt, dass der reziproke Wert des Radius r_2 auch wesentlich größer ist als der Wert des Radius r_1 (Gleichung 3.10).

$$r_1 \gg r_2 \Rightarrow \frac{1}{r_2} \gg \frac{1}{r_1} \quad (\text{Gln. 3.10})$$

Daraus folgt, dass der aus der Randkraft resultierende Anteil an der Gesamtkraft gegenüber dem Anteil aus der Kapillarkraft mit ausreichender Genauigkeit vernachlässigt werden darf. Daher darf die äußere Zugkraft F_{Ges} nach Gleichung 3.11 berechnet werden.

$$F_{\text{Ges}} = F_K = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot \pi \cdot r_1^2 \quad (\text{Gln. 3.11})$$

Wenn diese äußere Zugkraft nun gleich der Adhäsionskraft F_A gesetzt wird, so kann die Adhäsionsspannung σ_A für die vorliegenden Verhältnisse durch den Kapillardruck beschrieben werden (Gleichung 3.12).

$$\sigma_A = \frac{F_{\text{Ges}}}{\pi \cdot r_1^2} = \frac{F_K}{\pi \cdot r_1^2} = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Gln. 3.12})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
σ_A	: Adhäsionsspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]

Für den in Kap 3.2 beschriebenen Versuch kann der Radius r_2 mit Gleichung 9.4 über den durch die Kapillarflüssigkeit bedingten Abstand der Adhäsionstestzylinder d_2 mit dem Volumen der Restwassermenge V_{Rest} abgeschätzt werden (Gleichung 3.13).

$$r_2 = \frac{1}{2} \cdot d_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{Rest}}}{\pi \cdot r_1^2} \quad (\text{Gln. 3.13})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
V_{Rest}	: Restwassermenge	Länge ³	[m ³]

Für ein Volumen der Restflüssigkeit von 0,09 ml (Kap. 3.2) ergibt sich der Radius r_2 nach Gleichung 3.14.

$$r_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\text{Rest}}}{\pi \cdot r_1^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,09 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,031^2} = 0,0000149 \text{ m} = 14,9 \mu\text{m} \quad (\text{Gln. 3.14})$$

Mit diesem Radius r_2 und einer Oberflächenspannung von Wasser von $\gamma = 7,28 \cdot 10^{-5} \text{ kNm/m}^2$ (bei einer Temperatur $T = 20^\circ \text{ C}$) errechnet sich die theoretische Adhäsionsspannung $\sigma_{\text{A, th}}$ zwischen den Adhäsionstestzylindern mit Hilfe der Gleichung 3.12 zu:

$$\sigma_{\text{A, th}} = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = 7,28 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{1}{0,031} + \frac{1}{14,9 \cdot 10^{-6}} \right) = 4,9 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Gln. 3.15})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
$\sigma_{\text{A, th}}$: theoretische Adhäsionsspannung	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]

Die so theoretisch ermittelte Adhäsionsspannung $\sigma_{\text{A, th}}$ stimmt mit der gemessenen Adhäsionsspannung $\sigma_{\text{A}} = 5,1 \text{ kN/m}^2$ gut überein, so dass die für die Adhäsionsspannung abgeleitete Gleichung 3.12 als experimentell bestätigt angesehen werden kann.

Die Zulässigkeit der Vernachlässigung der Randkraft $F_{\text{R, n}}$ bzw. der Spannung $\sigma_{\text{A, R}}$, die sich aus dieser Kraft ergibt, kann ebenfalls rechnerisch dargelegt werden (Gleichung 3.16). Dabei wird der Sinus des Randwinkels δ nach oben mit 1 abgeschätzt.

$$\begin{aligned}\sigma_{A,R} &= \frac{F_{R,n}}{\pi \cdot r_1^2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \gamma \cdot \sin \delta}{\pi \cdot r_1^2} \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,031 \cdot 7,28 \cdot 10^{-5} \cdot 1}{\pi \cdot 0,031^2} = 0,005 \text{ kN/m}^2\end{aligned}\quad (\text{Gln. 3.16})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
$\sigma_{A,R}$: Anteil der Adhäsionsspannung aus Randkräften	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]

Die aus der Randkraft resultierende Adhäsionsspannung $\sigma_{A,R}$ ist somit etwa um drei Zehnerpotenzen kleiner als die aus der Kapillarkraft resultierende Adhäsionsspannung.

Die Adhäsionskräfte können für die vorliegende Geometrie der Festkörperoberflächen durch den Flüssigkeitsfilm in der Grenzfläche beschrieben werden. Bei konstanter Querschnittsfläche hängt die Größe der Adhäsionsspannungen nur von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und dem Kehrwert des Radius des Meniskus der Kapillarflüssigkeit ab. Dieser Radius kann für kleine Radien mit dem halben Abstand der Festkörperoberflächen gleichgesetzt werden, so dass die Adhäsionsspannungen mit dem Kehrwert des kleiner werdenden Abstandes ansteigen.

Die an einer Werkstoffoberfläche anhaftenden Tonstücke, die Verklebungen verursachen, sind i.A. auch wesentlich größer als der Radius des Meniskus der Kapillare in der Grenzfläche. Die Annahme hinsichtlich des Verhältnisses der Radien r_1 und r_2 werden daher als übertragbar angesehen.

Der Einfluss der Randkräfte, die außer von der Oberflächenspannung von der Benetzbarkeit der Oberfläche und damit vom Material des Festkörpers abhängen, kann mit hinreichender Genauigkeit vernachlässigt werden.

Fontaine [1954] kommt mit einem anderen theoretischen Ansatz auch zu dem Ergebnis, dass die Randkräfte keinen Einfluss haben.

Hieraus wird deutlich, dass eine tangentielle Adhäsionskraft, wie sie verschiedentlich beschrieben wird (z.B. Jancsecz [1991], Beretitsch [1992], Wilms [1995], Thewes [1999]) nur durch Scherkräfte in der Flüssigkeit zwischen den Festkörpern abgeleitet werden kann. Diese sind allerdings vergleichsweise klein, so dass keine besonders hohen Scherkräfte aufgenommen werden können. Im Allgemeinen kommt es daher durch Kräfte, die parallel zur

haftenden Oberfläche wirken, zu einem Rutschen der Haftpartner. Dies wird auch von Littleton [1976] postuliert. Die in Versuchen gemessenen Scherkräfte zwischen Böden und Festkörpern können daher nur auf den Einfluss der Abweichungen der Oberfläche von einer idealen Ebene – also durch die Rauigkeit der Oberflächen – und die dadurch verursachte zumindest teilweise Verlagerung der Scherebene in den Boden hinein verursacht werden. Hierauf wird in Kap. 11 noch ausführlicher eingegangen.

4 Verklebungen bei der Bearbeitung von Böden

4.1 Allgemein

Bei Kontakt von Böden mit adhäsiven Eigenschaften und den Oberflächen von Werkstoffen kann zu Anhaftungen der Böden kommen. Dies betrifft auch andere Bereiche der Bearbeitung des Werkstoffes Boden. So treten außer im Bereich des maschinellen Tunnelvortriebes Probleme hinsichtlich Verklebungen beispielsweise auf:

- in der Landwirtschaft beim Pflügen [Schachbasian, 1890, Nichols, 1925, Riek, 1963]
- im Bergbau bei der Gewinnung von Tonen,
- in der chemischen Verfahrenstechnik beim Tablettieren, Granulieren oder Agglomerieren von körnigen Stoffen [Rumpf 1958, 1974; Rumpf et al, 1967 1973, 1978; Schubert, 1972; Schütz, 1979; Hollinderbäumer et al., 1994],
- im Erdbau durch die Verringerung des effektiven Volumens der Grabgefäße [Beretitsch, 1992; Kühn 1990 und 1989; Schlick, 1989],
- in der Bohrtechnik durch das Verkleben der Bohrwerkzeuge oder des Bohrgestänges [Strauss et al., 2009] (Abbildung 4.1),
- bei der Verrohrung von Bohrungen [Schumacher, 2004],
- beim Einrammen / Einrütteln von Verbauelementen und
- beim Ziehen von Spundwänden, Stützen, etc.



Abbildung 4.1: Verklebtes Bohrgestänge [Strauss et al., 2009]

4.2 Verklebungen im maschinellen Tunnelbau

Das Anhaften von Böden an Tunnelbohrmaschinen hat bei zahlreichen Tunnelprojekten durch Verklebungen zu teilweise erheblichen Behinderungen des Vortriebes geführt. Einige ausgewählte Beispiele für Tunnelvortriebe, bei denen Verklebungen zu Behinderungen des Vortriebes geführt haben, sind:

- Eisenbahntunnel Katzenberg [Weh et al., 2009],
- Bologna Metro [Egli & Langmaack, 2008],
- Wesertunnel [Lüesse, 1999 und 2004],
- Tunnel Westerschelde [Thewes, 2003],
- U-Bahntunnel Lille, Linie 1 [Jancsecz, 1991],
- U-Bahntunnel Berlin, Linie 8 [Jancsecz, 1991].

Von Thewes [1999] und Geppert [1999] werden weitere zahlreiche Projekte genannt, bei denen es zu Schwierigkeiten infolge Verklebungen kam.

Derartige Verklebungen führen zu erheblichen Minderungen der Vortriebsleistungen bis hin zum Stillstand. Der anhaftende Boden muss in diesem Fall in der Regel händisch beseitigt werden. Im Regelfall werden dann für den weiteren Vortrieb verfahrenstechnische Maßnahmen notwendig, wie z.B. regelmäßige Reinigungen, Verringerung der Vortriebsgeschwindigkeit, höhere Spülzeiten oder der Zusatz von Additiven. Die Kosten für den Vortrieb werden dadurch enorm erhöht, einerseits direkt über zusätzliche Kosten für Reinigungsarbeiten, Spülungen, Kosten für den Zusatz von Additiven, etc. Andererseits indirekt über Kosten für die Entsorgung des mit Additiv vermischten Ausbruches, Abschreibungen, Verlängerung der Mietdauer für Geräte und Einrichtungen infolge der Verlängerung der Bauzeit, Mietausfälle, Konventionalstrafen, etc. Der wirtschaftliche Erfolg eines Tunnelprojektes wird dadurch in Frage gestellt.

4.3 Verklebungsprozess

Haftet der gelöste Boden auf seinem Transportweg an der Oberfläche der Maschinenteile an, handelt es sich um ein primäres Anhaften. Diese Anhaftungen stellen in Abhängigkeit ihrer Größe ein Hindernis für den Transport weiteren Bodens dar. An diesen Stellen können daher in der Folge weitere, größere Mengen Boden gebunden werden (sekundäre Anhaftungen). Dadurch wird die Menge des anhaftenden Bodens vergrößert. Es kommt in der Folge zu Verklebungen, d.h. zum Verstopfen des jeweiligen Teils des Abbausystems. Betroffen können

auch Bereiche sein, die zunächst kein Teil des Transportweges darstellen, z.B. die Werkzeughalterungen.

Gelöste Bodenpartikel können während ihres Transports auch untereinander wieder zusammenhaften. Dies wird auch als Reagglomeration bezeichnet. Dadurch können sich größere Klumpen bilden, deren Transport nun sehr leicht z.B. an Einlässen von Transportöffnungen, Rechen, etc. blockiert wird. Diese Anhaftungen stellen ein erhebliches Hindernis dar und es kommt in der Folge dadurch zu weiteren Anhaftungen.

Betroffen sind vor allem die Bereiche des Abbausystems, in denen die Bodenteile ablagern oder angedrückt werden und Zeit haben, sich an der Oberfläche der Werkstoffe und untereinander anzuhaften. Betroffen sind erfahrungsgemäß:

- die Halterungen der Scheidwerkzeuge, insbesondere am wenig bewegten Zentrum des Schneidrades,
- die Bereiche in denen sich der Fließquerschnitt ändert, z.B. an den Materialeinlassöffnungen,
- die Bereiche mit Hindernissen im Fließquerschnitt, z.B. an den Materialeinlassöffnungen oder an Rechen, z.B. vor Steinbrechern,
- die Bereiche hinter den Steinbrechern,
- Transportbänder und
- Übergabestationen, z.B. an den Transportbändern.

Entscheidend für das Zustandekommen von Verklebungen ist ein Kontakt des gelösten Tons mit den Werkstoffoberflächen. Kommt es zu Verklebungen, wird die Vortriebsgeschwindigkeit herabgesetzt.

4.4 Geotechnische und verfahrenstechnische Aspekte

Nach Erfahrungen von Guillaume & Mauroy [1997] kann es bei Böden mit einem Tongehalt ab etwa 15 -20 % zu Anhaftungen an Werkstoffoberflächen kommen. Als kritisch für Vortriebe gelten mittel- insbesondere aber ausgeprägt plastische Böden mit steifer – halbfester Konsistenz [Thewes, 1999 und 2003]. Tone ab einem Gehalt von 10 % an quellfähigen Tonmineralen gelten dabei als besonders verklebungsanfällig [Thewes, 1999].

Im Allgemeinen sind im Hinblick auf Verklebungen ungünstige Gebirgsverhältnisse im Regelfall Bereiche mit Wechsellagerungen aus adhäsiven Böden und nicht adhäsiven Böden bzw.

Gebirgen. In heterogenen Verhältnissen ist es im Regelfall schwierig, den Vortrieb den sich wechselnden Gebirgsverhältnissen schnell genug anzupassen.

Das Verklebungsrisiko bei einem Vortrieb hängt aber nicht allein von den adhäsiven Eigenschaften eines Baugrundes und den Gebirgsverhältnissen insgesamt, sondern wesentlich auch von seiner Behandlung, also vom jeweiligen Vortriebsverfahren ab.

Standfeste Gebirge, in denen ohne Stützung der Ortsbrust und mit einem Becherwerk-Bandaustrag gearbeitet werden kann, bedingen trockene Gebirgsverhältnisse. Sobald hier zu dem abgebauten, adhäsiven Gebirge (z.B. ein veränderlicher fester Tonstein) Wasser, auch in geringen Mengen, zugeführt wird, beispielsweise durch Grundwasserzuflüsse aus Klüften, kommt es zu Verklebungen am Becherwerk oder am Förderband [Weh et al., 2009].

Bei Vortrieben mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust in feinkörnigen, also potenziell adhäsiven Böden wird die Stütz- und Spülsuspension mit dem Feinkornanteil des gelösten Bodens vermischt. Dadurch ändert sich die Dichte der Suspension.. Die Spülung muss entsprechend regeneriert werden, bzw. es wird sehr viel frische Spülung benötigt. Dazu wird ein entsprechend großer Volumenstrom erforderlich. Kommt es hier zu Fehlsteuerungen, oder wird der Volumenstrom zu gering eingestellt, sedimentieren nicht dispergierte Bodenteile und es kann dort zu Verklebungen kommen. Insbesondere Zonen mit ohnehin geringer Suspensionsgeschwindigkeit, sog. Ruhezeiten, sind hier neuralgisch.

Günstig sind bei solchen Vortrieben Anteile von Sanden und Kiesen im Ausbruchquerschnitt, die durch deren Transport abrasiv auf anhaftende Bodenteile einwirken und so die Verklebungen beseitigen helfen [Weh et al., 2009]. Thewes [1999] gibt für einen ausgeprägt plastischen Ton einen Tonanteil von mindestens 10 - 15 % der Fläche der Ortsbrust an, ab der mit Verklebungen gerechnet werden muss.

Vortriebe mit erddruckgestützter Ortsbrust wurden für den Einsatz in feinkörnigen – also potenziell adhäsiven, zu Verklebungen neigenden Böden entwickelt. Das Scheidrad dient nicht nur als Werkzeugträger, sondern auch als Mischwerkzeug, um die für die Stützung der Ortsbrust erforderliche Konsistenz des Erdbreis einzustellen. Das Abbausystem besteht aus dem Abbau- und Mischbereich zwischen der Ortsbrust und der Vorderseite des Schneidrades sowie aus der Mischkammer zwischen der Rückseite des Schneidrades und der Druckwand. Die Scheidräder von Erddruckschildmaschinen sind daher weitgehend geschlossen. Die Größe der Materialeinlassöffnungen beträgt in der Regel nur zwischen 25 % und 35 % der Bruttoquerschnittsfläche des Schneidrades [Burger, 2006]. Bei manchen Erddruckschilden kommen Schneidräder zum Einsatz, die Hartgesteinsbohrköpfen entsprechen. Der gelöste

Baugrund muss in der Abbaukammer homogenisiert werden. Durch entsprechende Steuerung, durch die Wahl der Werkzeuge und insbesondere durch den Einsatz von Konditionierungsmitteln können auch stark wechselhafte Baugrundverhältnissen beherrscht werden. Im standfesten Gebirge werden die Maschinen dann üblicherweise ohne Stützung im sog. offenen Modus und in nicht standfestem Gebirge in einem teilgefüllten oder im geschlossenen Modus betrieben.

In verklebungsanfälligen Böden kommt der Einstellung der Konsistenz des Erdbreis eine entscheidende Bedeutung zu. Dabei muss auch darauf geachtet werden, dass die Konsistenz in einem Bereich liegt, der nur noch geringe Anhaftungen des Erdbreis an Oberflächen liefert. Bei heterogenen Gebirgsverhältnissen, bei denen nicht dispergierbare, adhäsive Tonteile und andere Lockergesteine zusammen auftreten, ist die Homogenisierung und damit die Einstellung der erforderlichen Konsistenz schwierig. Zusätzlich verändern nicht prognostizierte Grundwasserzutritte zur Abbaukammer die Konsistenz. Heterogene Gebirge, die adhäsive Böden enthalten und hydrogeologisch komplexe Gebirgsverhältnisse aufweisen sind daher als kritisch im Hinblick auf das Verklebungsrisiko einzuschätzen [Weh et al., 2009].

5 Stand des Wissens

5.1 Arbeiten zur Untersuchung von Anhaftungen an Werkstoffoberflächen

Das Verkleben von Werkzeugen war bei der Bearbeitung von Böden für landwirtschaftliche Zwecke sicherlich schon seit Jahrhunderten ein Problem. Fruchtbare, landwirtschaftlich besonders interessante Böden haben ein hohes Wasserbindevermögen aufgrund ihrer nennenswerten Tonanteile und neigen daher zum Anhaften an Werkzeugoberflächen. Die Erforschung der physikalischen Zusammenhänge auf wissenschaftlichen Grundlagen begann aber erst ab 1838 durch Schübler [1838, zitiert in: Schachbasian, 1890] im Zusammenhang mit der Einführung industrieller Produktionsweisen in der Landwirtschaft. Diese Versuche wurden durch Haberlandt [1879] fortgeführt. In diesen Arbeiten wird ein ziehendes Trennprinzip eingesetzt.

Nachfolgend werden die wesentlichen Untersuchungen zur Bestimmung der adhäsiven Eigenschaften von Böden mit ihren wesentlichen Ergebnissen, die für die vorliegende Arbeit relevant sind, vorgestellt.

5.1.1 Untersuchungen von Schachbasian

Anlass für die Versuche von Schachbasian [1890] sind Verklebung bzw. die damit einhergehende Leistungsminderung an landwirtschaftlichen Werkzeugen. Es werden Adhäsions- und Reibungskräfte von verschiedenen Böden (Kaolin, königl. Porzellanmanufaktur Nymphenburg, München, Quarzsand, Nürnberg, Humus, Aiblinger Moor, Oberbayern und Lehmboden, Ziegellehm von Berg am Laim, München) mit unterschiedlicher Wassersättigung (100 %, 80 %, 60 %) an Holz- und Stahloberflächen untersucht. Zur Sättigung wird destilliertes Wasser verwendet. Die Adhäsionskraft wird mit einer nach dem ziehenden Trennprinzip arbeitenden "Adhäsionswaage" gemessen (Abbildung 5.1). Dazu werden die Versuchsböden in ein rundes Probengefäß lagenweise eingebaut. Angaben zur Verdichtung der Böden sind nicht enthalten. Eine Versuchsplatte (100 cm² Fläche) aus Holz oder Metall wird auf die Versuchsböden aufgelegt und mit einem Gewicht (1 kg und 5 kg) 10 Minuten lang auf den eingebauten Boden aufgepresst. Dann wird die Versuchsplatte über einen Waagebalken abgezogen. Dazu wird Bleischrot in ein Gefäß am anderen Ende des Waagebalkens eingefüllt. Als Adhäsionskraft wird das Gewicht des Bleischrots definiert, bei welchem die Versuchsplatte von den Böden abgehoben wird. Die Böden werden von unten bewässert.

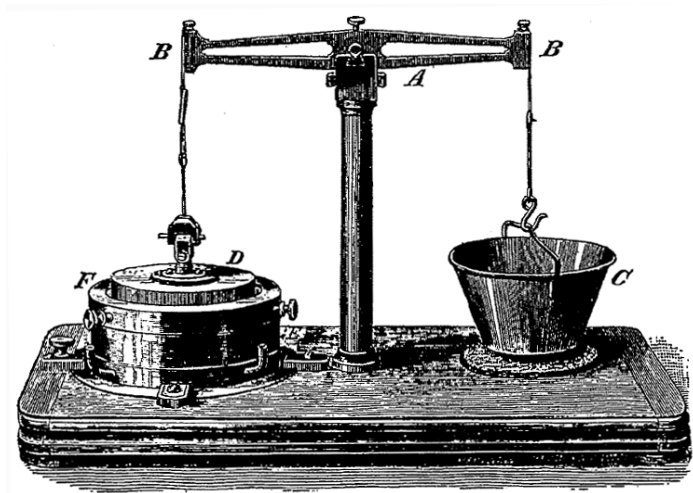


Abbildung 5.1: Adhäsionswaage nach Schachbasian [1890]

Die gemessenen Adhäsionsspannungen liegen zwischen ca. $0,1 \text{ kN/m}^2$ bis ca. $5,2 \text{ kN/m}^2$. Die höchsten Adhäsionsspannungen werden bei Böden mit hohem Anteil an Feinkorn gemessen. Es wird ein qualitativer Unterschied zwischen sandigen und tonigen Böden festgestellt. Bei sandigen Böden ist ein Anstieg der Adhäsion mit zunehmendem Wassergehalt festzustellen. Bei tonigen Böden wird bei einem bestimmten Wassergehalt ein Maximum erreicht. Bei höheren oder niedrigeren Wassergehalten nimmt die Adhäsion ab.

5.1.2 Untersuchungen von Atterberg

Die plastischen Eigenschaften von Böden im landwirtschaftlichen Sinne werden von Atterberg [1911] ausführlich behandelt. Darin wird außer der Fließgrenze und der Ausrollgrenze mit der Klebegrenze eine dritte Plastizitätsgrenze definiert. Die Klebegrenze ist der Zustand (bzw. der Wassergehalt eines Bodens), bei welchem ein Ton nicht mehr an Metallen klebt. Als Standardmaterial wählt Atterberg eine Nickeloberfläche. Atterberg findet, dass „die Klebegrenzen für Nickel und Eisen nicht verschieden zu sein scheinen“. Der Wassergehalt an der Klebegrenze kann aber höher oder niedriger als der Wassergehalt an der Fließgrenze liegen. Außerdem untersucht Atterberg den Einfluss der Temperatur auf die Plastizitätsgrenzen und findet bei Temperaturen von 7° C und 20° C Abweichungen von maximal ca. 11 %, in der Regel jedoch $< 5 \%$.

Die Definition der Klebegrenze von Atterberg wird in der Folge zunächst auch für bodenmechanische Fragestellungen übernommen [Terzaghi, 1925] und [Terzaghi & Peck, 1961]. In späterer Literatur für bodenmechanische Zwecke wird die Klebegrenze jedoch nicht weiter behandelt.

5.1.3 Untersuchungen von Nichols

Ebenfalls für landwirtschaftliche Fragestellungen untersucht Nichols [1925] die Reibung zwischen Metalloberflächen und Böden.

Diese Untersuchungen in der Folgezeit werden fortgeführt [Nichols & Bayer, 1930, Nichols, 1930] und die Abhängigkeit der Reibung und der Adhäsion bzw. der daraus resultierenden Gerätewahl (Gewicht, Pflugart, Bereifung, etc.) für verschiedene Bodenparameter (u.a. Tongehalt, Wassergehalt, Zustandgrenzen nach Atterberg) angegeben. Dazu werden fünf bindige Böden bei verschiedenen Wassergehalten untersucht. Die Versuche werden u.a. an einem Modellpflug vorgenommen. Es wird u.a. ein Anstieg der Adhäsion mit der Plastizität eines Bodens festgestellt.

5.1.4 Untersuchungen von Fountaine

Die Untersuchungen von Fountaine [1954] sind bodenmechanisch orientiert. Er verwendet ein von ihm entwickeltes „Boden-Adhäsionsgerät“. Das Gerät verfolgt das Prinzip eines ziehenden Trennversuches. Es werden Versuchsreihen mit Variation des Porenwasserdruckes durchgeführt. Der Porenwasserdruck wird an der Probenseite, die der Lastplatte abgewandt ist, eingestellt. Es werden 8 Materialien und 5 Böden untersucht (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1 Materialien und Böden der Untersuchungen von Fountaine [1954]

Lastplatte	Versuchsböden
<ul style="list-style-type: none">• Chrom• Paraffin• Aluminium• PVC• Perpex• Polythen• Wachs• Brass	<ul style="list-style-type: none">• Ton• Ton/Schluff• Schluff• Sand• Sandiger Boden

Für die Versuche wird eine Platte mit einer definierten Last (ca. 60 kN/m²) für eine bestimmte Zeit (30 s) oder bis zu einer bestimmten Verformung der Bodenprobe aufgebracht und diese Platte mit einer definierten Lastrate abgezogen. Es werden auch Versuche mit Messung des Porenwasserdruckes durchgeführt.

Die Versuche an Tonböden und einer Chromoberfläche zeigen die höchsten Adhäsionsspannungen von ca. 20 – 28 kN/m². Eine signifikante Abhängigkeit der

Adhäsionsspannungen vom Material der Lastplatte geht aus den Versuchsergebnissen aber nicht hervor.

Die Versuche mit Schluffböden liefern deutlich geringere Werte ($6 - 7 \text{ kN/m}^2$) als die für den Tonböden. Die Versuche an den rolligen Böden zeigen nur geringe Adhäsionsspannungen kleiner als $0,5 \text{ kN/m}^2$.

Es zeigt sich bei dem Tonboden ein Anstieg der Adhäsionsspannung entsprechend der Steigerung der Saugspannung. Bei dem Sandboden ist die Zunahme der Adhäsionsspannung geringer als die Steigerung der Saugspannung (Abbildung 5.2).

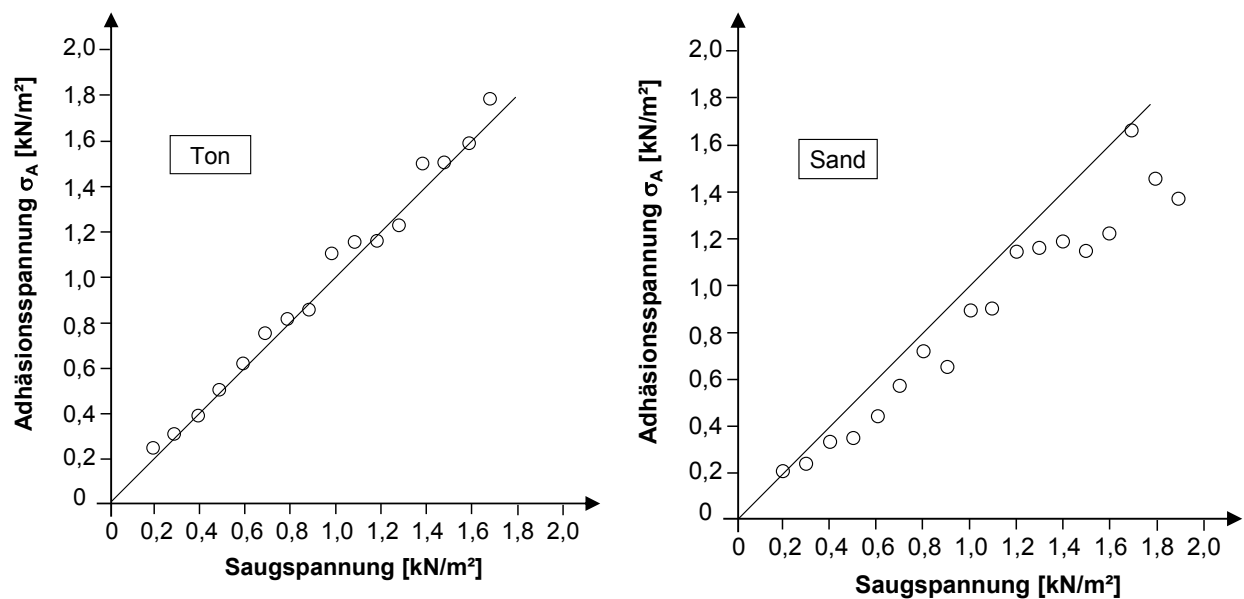


Abbildung 5.2: Abhängigkeit der Adhäsion von der Saugspannung [verändert nach Fountaine, 1954]

Weiterhin werden kraftgeregelte Versuche mit verschiedenen Flüssigkeiten (Wasser, Nitrobenzen und Alkohol) durchgeführt, um den Einfluss der Oberflächenspannung der Flüssigkeiten auf die Adhäsion zu untersuchen. Es zeigt sich, dass Nitrobenzen und Alkohol, die gegenüber Wasser deutlich geringere Oberflächenspannungen ($\gamma_{\text{Wasser}} = 7,28 \cdot 10^{-5} \text{ kNm/m}^2$; $\gamma_{\text{Nitrobenzen}} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ kNm/m}^2$; $\gamma_{\text{Alkohol}} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ kNm/m}^2$) haben, ca. 60 % bzw. 75 % geringere Adhäsionsspannungen liefern.

Versuche mit zwei verschiedenen Trenngeschwindigkeiten zeigen einen Anstieg der Adhäsionsspannungen mit zunehmender Trenngeschwindigkeit. Der Unterschied der Adhäsionsspannungen wird tendenziell mit höherer Durchlässigkeit der Böden kleiner.

Fontaine führt die Adhäsion vollständig auf den Wasserfilm zwischen Boden und Werkstoff zurück. Dabei zeigt er aufgrund theoretischer Überlegungen, dass der Benetzungswinkel keinen Einfluss auf die Adhäsion hat.

5.1.5 Untersuchungen von Rumpf

Rumpf stellt in [Rumpf, 1958] vor dem Hintergrund des Granulierens von staubförmigen Gütern Berechnungen zur Zugfestigkeit der Granulate an. Dabei werden die in Tabelle 5.2 zusammengestellten fünf Bindungsmechanismen unterschieden.

Tabelle 5.2 Bindungsmechanismen [verändert nach Rumpf, 1958]

Festkörperbücken	Grenzflächenkräfte und Kapillardruck an frei beweglichen Flüssigkeitsoberflächen	Adhäsions- und Kohäsionskräfte in nicht frei beweglichen Bindemittelbrücken	Anziehungskräfte zwischen den Feststoffteilchen	Formschlüssige Bindung
<ul style="list-style-type: none"> ○ Sinterung, Rekristallisation, Kornwachstum ○ Chemische Reaktionen ○ Schmelzhaftung ○ Erhärtende Bindemittel ○ Kristallisation gelöster Stoffe 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Flüssigkeitsbrücken zwischen einzelnen Körnern ○ Kapillarkräfte an der Oberfläche flüssigkeitserfüllter Haufwerke ○ Oberflächenspannung mit Festkörnern ○ Tropfen 	<ul style="list-style-type: none"> ○ zähflüssige Bindemittel, erhärtende Bindemittel, Klebstoffe ○ Adsorptionsschichten genügender Dicke ($< 30 \text{ \AA}$) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ van-der-Waals-Kräfte ○ Valenzbindung ○ elektrostatische Aufladung 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fasern ○ Eingefaltete Plättchen

Als oberen Grenzabstand für den Einfluss von van-der-Waals-Kräften gibt Rumpf 10 nm an und für den oberen Grenzabstand für den Einfluss von Adsorptionskräften 3 nm.

In der Arbeit von [Pietsch & Rumpf, 1967] wird der Haftmechanismus infolge einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln ausführlich erläutert. Dabei werden der Kapillardruck und die Randkräfte infolge der Oberflächenspannung in bzw. an der Flüssigkeitsbrücke als Komponenten der Haftkraft dargestellt. Die Gleichung zur Berechnung des Zwickelvolumens der Flüssigkeitsbrücke werden abgeleitet (Abbildung 5.3).

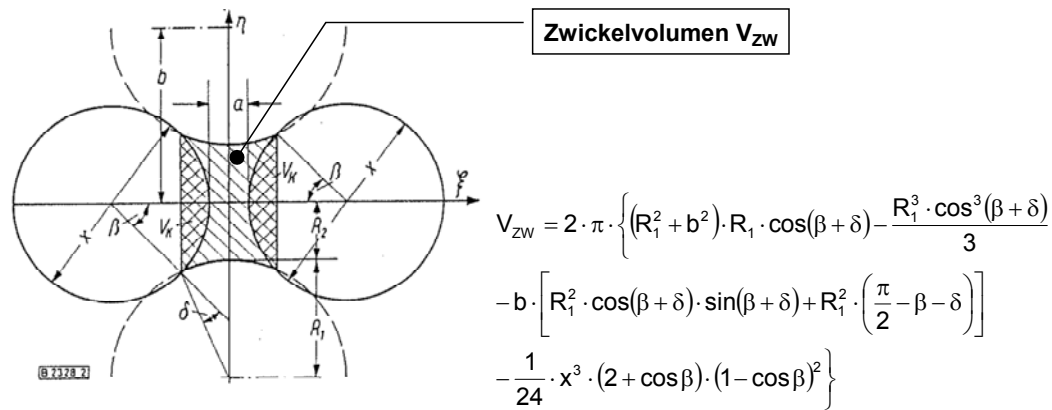


Abbildung 5.3: Modell für den Haftmechanismus zwischen zwei Kugeln infolge einer Flüssigkeitsbrücke, Berechnung des Zwickelvolumens [verändert nach Pietsch & Rumpf, 1967]

Untersuchungen der Haftkraft u.a. zwischen Glaskugeln und Goldkugeln unter Berücksichtigung der Rauigkeit, des Winkels zwischen Flächennormale und Trennkraft und Sintertemperaturen sind in [Polke, Krupp und Rumpf, 1973] dargestellt.

In [Rumpf, 1974] und [Rumpf & Schubert, 1978] werden u.a. die Haftmechanismen zwischen Körnern bzw. eines Haufwerkes besonders für Flüssigkeitsbrücken für verschiedene Korndurchmesser sowie der Einfluss von Rauigkeiten der Körner dargelegt.

5.1.6 Untersuchungen von Potyondy

Potyondy [1961] untersucht die Reibung zwischen verschiedenen Böden und den Baustoffen Stahl, Holz und Beton. Er verwendet dazu ein Rahmenschergerät. Es werden zwei Rauigkeiten untersucht, eine mit Sandpapier geschliffene und eine angerostete Oberfläche. Die Oberflächenrauigkeiten werden nicht quantifiziert. Es wird ein Ton und eine Mischung aus einem Sand und dem Ton mit einem Verhältnis von 50 % Sand und 50 % Ton. Zusätzlich wurden ein gebrochener und ein gemahlener Granit verwendet. Es wurden Versuche mit zwei Wassergehalten (Versuche am Ton), bzw. drei Wassergehalten (Versuche am Sand-Ton-Gemisch) durchgeführt.

Die Versuche mit dem niedrigeren Wassergehalt, bzw. mit der größeren Konsistenzzahl ergeben höhere Reibungswiderstände. Interessant ist, dass die Ergebnisse der Versuche am Ton in zwei Bereiche unterteilt werden können: in einen Bereich, in dem der Reibungswiderstand mit zunehmender Normalspannung ansteigt und anschließend einen Bereich ab dem der Reibungswiderstand konstant bleibt und von der Normalspannung unabhängig ist.

Bei den Versuchen mit dem Ton-Sand-Gemisch wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Normalspannung und der Reibung festgestellt. Weiterhin stellt Potyondy nach den Versuchen unterschiedliche Wassergehalte im Ton fest. An der Grenze zwischen Boden und Stahl wurden ca. 2 - 5,5 % größere Wassergehalte festgestellt als im Durchschnitt der restlichen Bodenprobe.

5.1.7 Untersuchungen von Riek

Motivation der Untersuchungen von Riek [1963] sind Verklebungen an landwirtschaftlichen Maschinen. Es werden neben der Adhäsion von Boden an Werkstoffoberflächen auch Adhäsion von Boden an Gummireifen untersucht. Es werden u.a. der Einfluss des Anpressdruckes von Prüfplatten an Böden, der Einfluss des Wassergehaltes, der Einfluss der Temperatur, der Einfluss der Oberflächenrauigkeit und der Einfluss des Werkstoffes untersucht.

Riek entwickelt eine Adhäsionswaage ähnlich dem von Schachbasian verwendeten ziehenden Trennprinzip, bei der durch Füllen von Gewichtsgefäßen mit Wasser die Eigengewichte von Prüf- und Druckplatte ausgeglichen werden, so dass der Anpressdruck dadurch beliebig gewählt werden kann. Es werden die Feinkornanteile aus einem verwitterten Gestein des Lias α mit Lößbeimengungen aus Stuttgart-Hohenheim und aus einem verwitterten Stubensandstein aus Waldenbruch jeweils in „krümeliger“ und „pastöser“ Struktur bei Wassergehalten zwischen ca. 16 % und ca. 27 % verwendet (Anmerkung: Gesteine des Lias α bestehen i.A. aus Ton- und Sandsteinen).

Riek beobachtet eine Zunahme der Adhäsionskräfte mit zunehmendem Anpressdruck und mit zunehmendem Wassergehalt sowie eine Abnahme mit zunehmender Andruckdauer. Weiterhin stellt Riek eine Zunahme der Adhäsion mit zunehmender Trenngeschwindigkeit fest.

Der Einfluss der Temperatur wird durch eine beheizbare Prüfplatte aus geschliffenem Messing untersucht. Die Adhäsionskräfte nehmen bei den Versuchen mit zunehmender Temperatur ab. Zur Untersuchung des Einflusses der Rauigkeit der Werkstoffoberflächen wurden Versuche mit Prüfplatten aus Edelstahl und aus Messing jeweils mit verschiedenen Rauigkeiten zwischen $R_z = \text{ca. } 0,1 \mu\text{m}$ (aus Oberflächenaufnahmen geschätzt) und $\text{ca. } 30 \mu\text{m}$ und durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Adhäsionskräfte mit abnehmender Rauigkeit, wobei der maximale Unterschied der Adhäsionskräfte ca. 30 % beträgt. In weiteren Versuchsreihen wurde der Einfluss der Art des Werkstoffes untersucht. Dazu wurden folgende Werkstoffe untersucht:

- Metallische Prüfplatten: Messing, poliert; Chrom, poliert; Stahl, feuerverzinkt; Aluminium, poliert; Stahl, mit Walzhaut
- Prüfplatten aus Kunststoff: Hart PVC, poliert; „Durethan BK“, poliert; Teflon, poliert; Moosgummi
- Prüfplatte aus lackiertem Holz

Die Adhäsionsspannungen σ_A bei Verwendung der metallischen Prüfplatten liegen bei verschiedenen Andruckspannungen σ_D jeweils in vergleichbarer Größenordnung von $\sigma_A = \text{ca. } 3,5 - 3,8 \text{ kN/m}^2$ (bei $\sigma_D = 30 \text{ kN/m}^2$) bzw. $\sigma_A = \text{ca. } 6,9 - 8,7 \text{ kN/m}^2$ (bei $\sigma_D = 60 \text{ kN/m}^2$). Die Adhäsionskräfte bei Verwendung der Prüfplatten aus Kunststoff (Hart PVC, Durethan BK) und aus Holz sind ca. 10 % – 15 % geringer als bei Verwendung von metallischen Prüfplatten. Die Adhäsionskräfte bei Verwendung der Prüfplatte aus Teflon sind ca. 40 % - 50 % geringer als bei Verwendung von metallischen Prüfplatten (Abbildung 5.4).

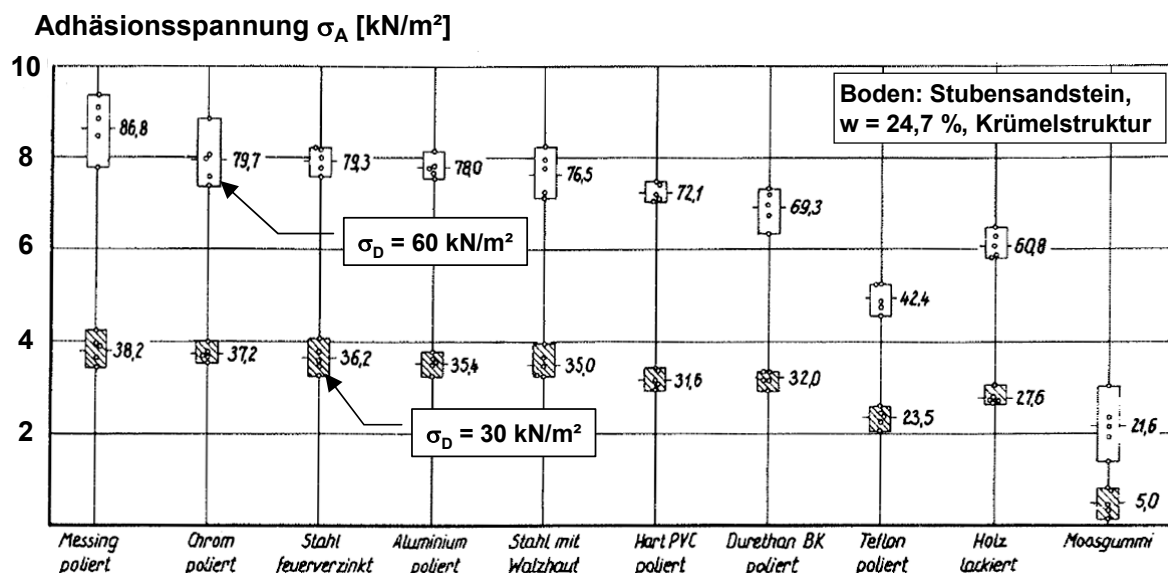


Abbildung 5.4: Adhäsionskräfte in Abhängigkeit des Werkstoffes [verändert nach Riek, 1963]

5.1.8 Untersuchungen von Wolkewitz

Zur Schaffung von Grundlagen für landwirtschaftliche Bodenverbesserungsmaßnahmen untersucht Wolkewitz [1964] u.a. die Adhäsionseigenschaften der mineralischen Bestandteile von Kulturböden. Dazu werden diese Bestandteile, insbesondere die Tonfraktion, extrahiert und daraus insgesamt 70 verschiedene Bodenarten im bodenmechanischen Sinne zusammengemischt. Die Böden werden mit Wassergehalten zwischen ca. 40 % und ca. 110% untersucht.

Zur Messung der Adhäsionseigenschaften wird ein nach dem ziehenden Trennprinzip arbeitender Versuch entwickelt, bei dem eine Quarzkugel bis zu einer definierten Tiefe in den Boden eingedrückt und anschließend herausgezogen wird. Die zum Herausziehen erforderliche Kraft wird als Adhäsionskraft definiert. Diese wird auf die Bodenkontaktfläche der Kugel bezogen und so die Adhäsionsspannung ermittelt. Die so gemessenen Adhäsionsspannungen betragen bis ca. 100 kN/m². Weiterhin findet Wolkewitz, dass die Adhäsionsspannungen mit zunehmender Bodenfeuchte abnehmen.

Die von Wolkewitz gewählte Versuchsanordnung weist zwei Nachteile auf. Das Eindringen der Prüfkugel bedingt zum einen eine erhebliche und kaum bewertbare Veränderung des Bodengefüges mit entsprechender erheblicher, nicht quantifizierbarer Veränderung des lokalen Wassergehaltes des Bodens. Zum anderen sind die mechanischen Bedingungen in der kugelförmigen Geometrie der Kontaktfläche schwer zu beschreiben. Es können hierbei Kräfte, die normal zur Prüfkugeloberfläche wirken nicht von Kräften unterschieden werden, die parallel dazu wirken.

Diese Versuche führten 1972 zur Herausgabe der DIN 19683: „Laborversuch zur Bestimmung der Adhäsion“. Diese Norm wurde jedoch wieder zurückgezogen. Sie stellte das bisher einzige genormte Bestimmungsverfahren für Adhäsionseigenschaften dar.

5.1.9 Untersuchungen von Schubert

Schubert [1972] untersucht die Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen sowohl theoretisch als auch experimentell. Dabei unterscheidet er drei vom Sättigungsgrad des Stoffes abhängige Bereiche der Zugfestigkeit der Stoffe. Im Bereich geringer Sättigung (bis $S_r = \text{ca. } 0,3$) werden isolierte Flüssigkeitsbrücken zwischen den Körnern als Ursache der Zugfestigkeit des gesamten Haufwerks angeführt. Bei hohen Sättigungsgraden (ab $S_r = \text{ca. } 0,8$) wird ein geschlossener Kapillarwasserraum unterstellt. Hierfür gibt Schubert den Kapillardruck als Ursache der Zugfestigkeit an. Bei Sättigungsgraden $S_r \rightarrow 1$ wiederum wird die Zugfestigkeit stark verringert und wird bei $S_r = 1$ null. Im Übergangsbereich zwischen geringer und hoher Sättigung des Haufwerks werden sowohl isolierte Flüssigkeitsbrücken als auch offene Kapillarwasserräume angenommen, die eine Zugfestigkeit des Haufwerks verursachen. Die höchsten Zugfestigkeiten misst Schubert im Bereich hoher Sättigungsgrade.

Schubert führt die Zugfestigkeit körniger Stoffe auf in Flüssigkeitsbrücken zwischen einzelnen Körnern wirkende Kapillarkräfte (geringe Sättigung), bzw. auf Kapillardruck des Kapillarwassers zurück.

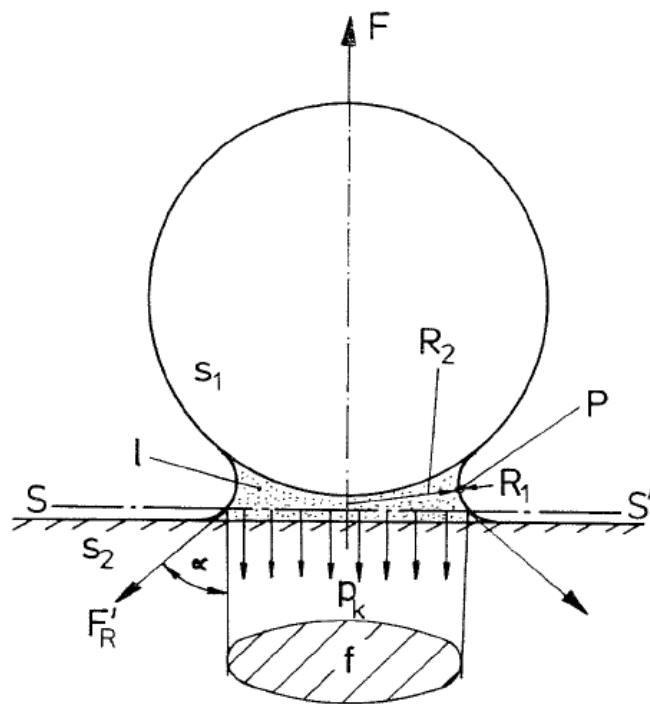
5.1.10 Untersuchungen von Littleton

Littleton [1976] untersucht die Adhäsion von Ton an Stahloberflächen an zwei ausgeprägt plastischen Tonen, einem kaolinitisch und einem illitisch dominierten Ton in Scherversuchen. Dazu wird ein Rahmenschergerät mit einer Stahlplatte im unteren Rahmen verwendet. Es werden konsolidierte dränierte und undräßierte Versuche durchgeführt. Zum Vergleich werden Scherversuche an den Böden durchgeführt.

Das Verhalten der Scherspannungs-Verschiebungsverhalten der Scherversuche an den Böden ist deutlich duktiler als das der Scherversuche zwischen Boden und Stahlplatte. Die Stahloberfläche war im Mittel zu 90 % mit Tonkorn besetzt, so dass davon auszugehen ist, dass die Scherfuge im Wesentlichen im Boden und nicht in der Grenzfläche zwischen Boden und Stahlplatte liegt.

5.1.11 Untersuchungen von Schütz

In der Arbeit von Schütz [1979] wird die Haftung von Feststoffpartikeln an Festkörperoberflächen in gasförmiger Umgebung untersucht. Dabei werden besonders die Verformung des Kontaktbereiches einzelner Partikel als Einfluss von äußeren Druckkräften und die Umgebungsfeuchte betrachtet. Schütz nimmt an, dass sich unter dem Einfluss äußerer Druckkräfte die im Nanometerbereich liegenden Rauigkeiten (sog. Nanorauigkeiten) der Oberflächen derart verändern, dass sich die Abstände zwischen den Haftpartnern so verändern, dass die Kapillarkräfte erheblich zunehmen. Weiterhin wird dargelegt, dass dann die Abstände so gering werden können, dass auch van-der-Waals-Kräfte eine Rolle spielen können. Der maßgebliche Haftmechanismus sind die an bzw. in einer Flüssigkeitsbrücke zwischen einem Feststoffpartikel und einer Festkörperoberfläche (Abbildung 5.5) wirkenden Randkräfte F'_R und der Kapillardruck p_K . Die Randkräfte werden durch das Produkt aus Oberflächenspannung und Umfangslänge, die Kapillarkräfte mit der Laplace-Gleichung beschrieben (vgl. Kapitel 3.3).



s_1 :	Feststoffkugel
s_2 :	Glatte Festkörperoberfläche
R_1, R_2 :	Hauptkrümmungsradien
l :	Flüssigkeitsbrücke
F :	Äußere Kraft
F'_R :	Randkraft
p_k :	Kapillardruck
$S-S'$:	Schnittebene
f :	Schnittfläche
α :	Grenzflächenwinkel
P :	Betrachter Punkt

Abbildung 5.5: Flüssigkeitsbrücke zwischen einer Kugel und einer Platte [Schütz, 1979]

5.1.12 Untersuchungen von Schlick

Gegenstand der Arbeit von Schlick [1989] sind Untersuchungen über Verlustfaktoren im maschinellen Erdbau infolge des Anhaftens (Adhäsion) von Böden an Grabwerkzeugen. Dazu wird ein Adhäsionskraftmessgerät entwickelt. Darin wird der Versuchsboden in einen 20 cm x 20 cm großen Rahmen eingebaut, eine Haftplatte mit einer definierten Kraft aufgebracht und die Haftplatte anschließend abgezogen. Die Kräfte werden an der Haftplatte normal und parallel zur Haftplatte gemessen. Außerdem wird ein Kreistringschergerät modifiziert, und versucht, tangentielle Adhäsion zu messen. Es werden 6 Versuchsböden für Adhäsionsversuche verwendet. Bei den Versuchen werden die Einflüsse aus Anpressdauer, Anpressspannung, Trenngeschwindigkeit, Wassergehalt, Konsistenz, Plastizität und Temperatur untersucht.

Es wird u.a. eine Abnahme der Adhäsionsspannungen mit zunehmender Konsistenzzahl, also mit geringerem Wassergehalt festgestellt. Weiterhin kann eine Zunahme der Adhäsion bei Böden mit größerer Plastizität nachgewiesen werden (Abbildung 5.6).

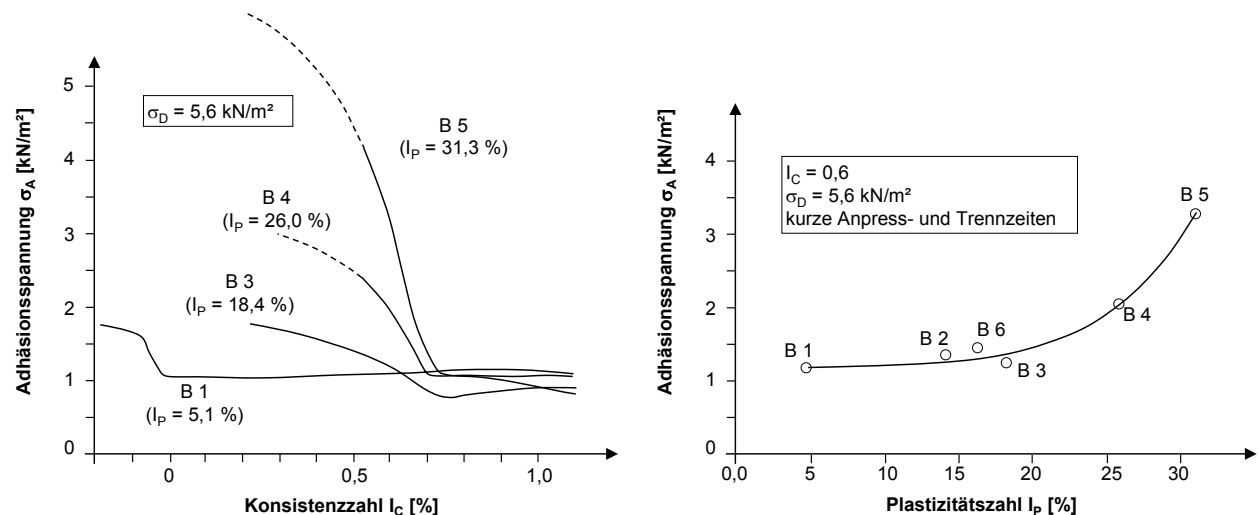


Abbildung 5.6: Adhäsion in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl I_C und der Plastizitätszahl I_P [verändert nach Schlick, 1989]

Die Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur der Werkstoffoberfläche auf die Adhäsionskräfte werden bis Temperaturen von 100°C durchgeführt. Es zeigt sich ein deutlicher Abfall der Adhäsion bei steigender Temperatur.

Die Ergebnisse werden in Diagrammen zusammengefasst, in denen die Adhäsionswirkung in Zonen in Abhängigkeit von der Plastizität und der Konsistenz des Bodens dargestellt wird (Abbildung 5.7).

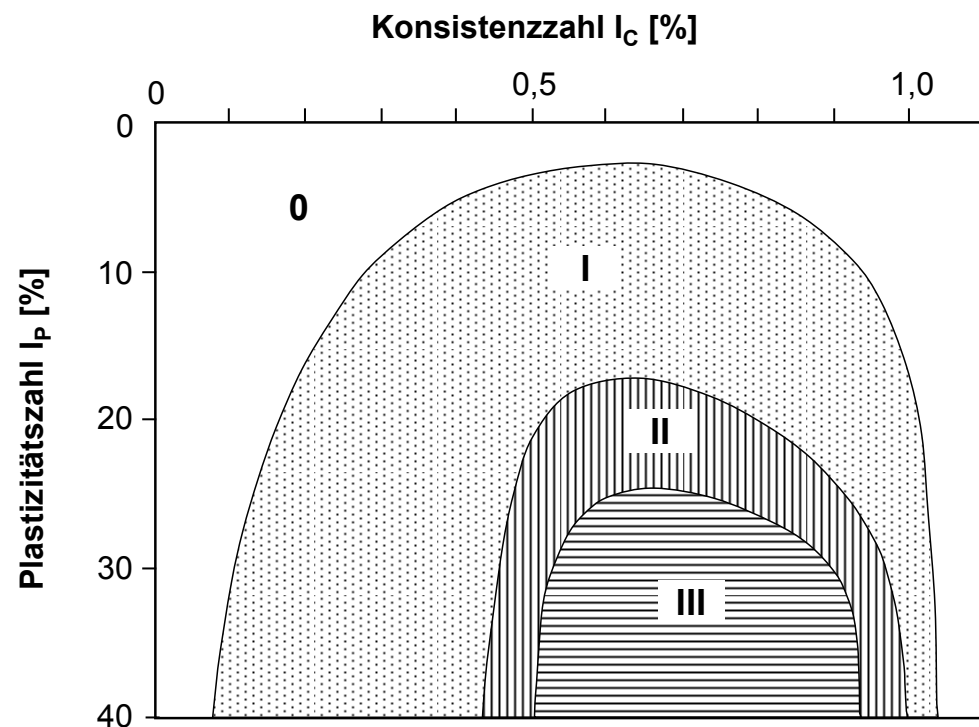


Abbildung 5.7: Adhäsionszonen 0, I, II und III in Abhängigkeit der Konsistenz und der Plastizität [verändert nach Schlick, 1989]

Für die verschiedenen Zonen werden die in Tabelle 5.3 zusammengestellten Eigenschaften definiert.

Tabelle 5.3 Eigenschaften der Adhäsionszonen [verändert nach Schlick, 1989]

Zone	Wirkung	Maßnahme
Zone 0	Keine oder geringste Anhaftungen	entfällt
Zone I	Geringe Anhaftungen vornehmlich im Bereich von Stauzonen und schlecht entleerbaren Räumen, 1 - 5 % Füllvolumenverminderung bei Grabwerkzeugen	Normal bearbeitbar, im Regelfall keine Maßnahmen erforderlich
Zone II	Wie Zone I, jedoch höhere Füllvolumenverminderung bei Grabwerkzeugen	Bei größeren Maßnahmen Füllfaktor um 5 - 10 % abmindern, adhäsionsgünstige Werkzeuge einsetzen
Zone III	Starker Adhäsionseinfluss, hohe Ladevolumenverminderung, die in zunehmendem Maße von der Zugfestigkeit des sekundären Bodengefüges abhängt (Verkleben des Werkzeuges, Trennfläche verläuft im Boden)	Starke Abminderung des Füllfaktors, häufige Werkzeugreinigung, Zusatzmaßnahmen: z.B. spezielle Werkzeuge einsetzen (Verweis auf Kap. 8.3, 8.4, 8.5)

5.1.13 Untersuchungen von Jancsecz

Erstmals für den Hintergrund tunnelbautechnischer Fragestellung beschreibt Jancsecz [1991] die Abhängigkeit der Adhäsion von den Bodeneigenschaften. Dazu werden die Ergebnisse aus Versuchen nach dem scherenden Trennprinzip in Abhängigkeit der Plastizitätsgrenzen dargestellt (Abbildung 5.8). Es wird ein Maximum der Adhäsion zwischen der Ausrollgrenze w_P und der Fließgrenze w_L sowie ein Anstieg der Adhäsion mit zunehmender Plastizität festgestellt.

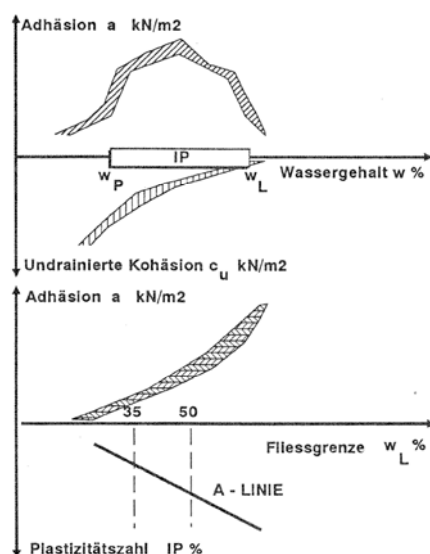


Abbildung 5.8: Adhäsion (scherendes Trennprinzip) in Abhängigkeit von den Plastizitätsgrenzen [Jancsecz, 1991]

5.1.14 Untersuchungen von Beretitsch

Beretitsch [1992] untersucht Kräfte an Schneidwerkzeugen beim Lösen von Böden für erdbautechnische Fragestellungen. Dazu werden dynamische Scher- und Reibversuche durchgeführt. Es werden Wassergehalt, Struktur des Bodens, Schergeschwindigkeit und Normalspannung variiert. Die Versuche werden an drei bindigen Böden, einem leichtplastischen Schluff (Boden C), einem leichtplastischen Ton (Boden B) und einem mittelpplastischen Ton (Boden A) mit Anteilen von Tonkorn zwischen 10 % und 30 % und Anteilen von Sandkorn zwischen 10 % und 40 % durchgeführt.

Es wird nachgewiesen, dass die Scherkräfte sehr stark von der Schergeschwindigkeit abhängen. Es wird u.a. ein "Messzahn" entwickelt, mit dem ein Schneidwerkzeug simuliert wird. Dieses Versuchsprinzip entspricht einem schälenden Trennmechanismus. In der Arbeit werden die verschiedenen Aspekte der auf ein Lösewerkzeug einwirkenden Kräfte dargestellt. Dazu zählen auch die Adhäsionskräfte. Es werden Versuche zur Reibung zwischen Boden und Stahl mit verschiedenen Versuchsböden durchgeführt. Bei diesen Versuchen werden auch Adhäsionskräfte untersucht.

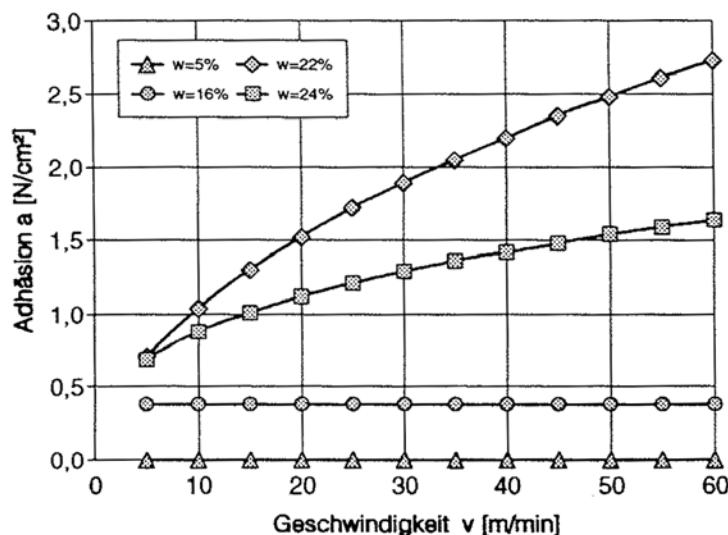


Abbildung 5.9: Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit nach Beretitsch [1992]

Es wird ein Zusammenhang zwischen Reibungswiderstand, Wassergehalt und Schergeschwindigkeit nachgewiesen. Dieser Zusammenhang kann in Phasen unterteilt werden. Die Ausprägung der Phasen und die Wassergehalte an den jeweiligen Phasengrenzen hängen stark von der Bodenart ab. Weiterhin zeigt sich, dass die Adhäsion ab einem bestimmten Wassergehalt mit der Schergeschwindigkeit zunimmt (Abbildung 5.9).

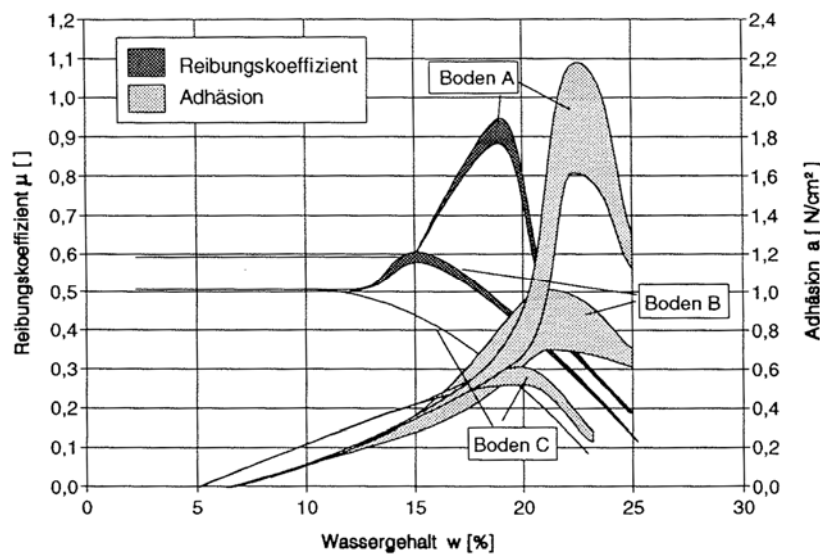


Abbildung 5.10: Reibungskoeffizient und Adhäsion in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Böden A, B und C nach Beretitsch [1992]

Als "kritisch" für den Scherwiderstand und damit auch für die Adhäsion werden Wassergehalte nahe der Ausrollgrenze identifiziert. Hier erreichen Reibungskoeffizient und Adhäsion ein Maximum (Abbildung 5.10).

5.1.15 Untersuchungen von Hollinderbäumer und Hoberg

Anlass der Arbeit von Hollinderbäumer & Hoberg [1994] sind Anhaftungen feuchter Schüttgüter an Apparatewänden, die zu Leistungsminderungen oder zu Wartungsarbeiten führen. Dazu werden zunächst die Haftkräfte - basierend auf den Arbeiten von Rumpf und Schubert - theoretisch betrachtet. Dabei werden die Kapillarkräfte zwischen einem einzelnen Schüttgutpartikel und der Apparatewand als wesentliche Ursache für das Anbacken herausgestellt. Darauf aufbauend wird das Anhaften eines Konglomerates von Schüttgutpartikeln und dabei die parallel zur Werkstoffoberfläche wirkenden Kräfte untersucht. Die Scherkraft zum Lösen des Konglomerates, jetzt als „Anbackungsdicke“ definiert, wird in Abhängigkeit vom Winkel der Apparateoberfläche dargestellt. In weiteren Versuchen wird mit einem Schergerät die Haftspannung untersucht. Dabei werden verschiedene Korngrößenbereiche untersucht und mit den theoretisch errechneten Kräften verglichen. Weiterhin wird die Haftkraft als Funktion des Werkstoffes untersucht. Die Haftmechanismen werden auf die Kapillarkräfte von Flüssigkeitsbrücken zurückgeführt. Die Abhängigkeit der Haftspannung vom Korndurchmesser wird in einem Diagramm dargestellt. Darin ist auch ein Vergleich zu den theoretischen Haftspannungen angegeben (Abbildung 5.11).

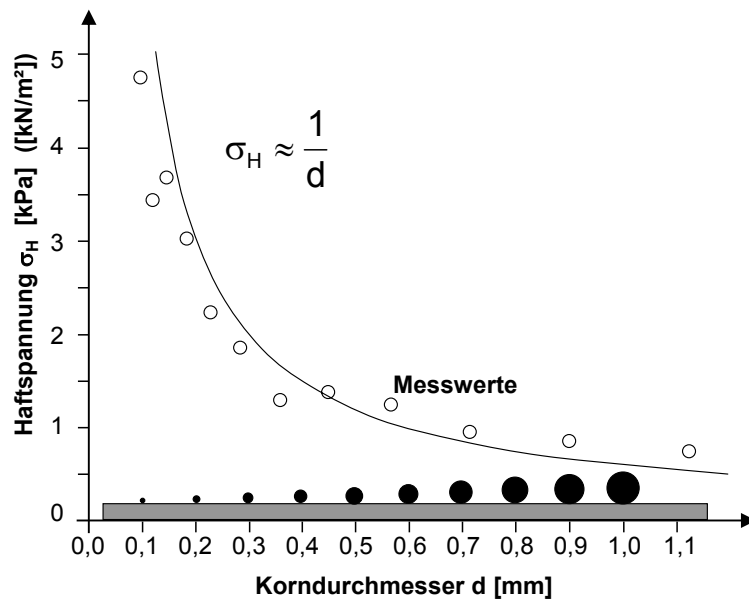


Abbildung 5.11: Haftspannung in Abhängigkeit des Korndurchmessers [verändert nach Hollinderbäumer & Hobert, 1994]

5.1.16 Untersuchungen von Wilms

Tunnelbautechnische Fragestellungen u.a. zur Adhäsion werden in der Arbeit von Wilms [1995] behandelt, wobei 16 Böden untersucht werden. Drei dieser Böden entstammen aus Bodenproben aus einem Tunnelprojekt in Essen, die Böden 4 - 16 sind laborativ aufbereitete Böden. Es wird ein sandiger Schluff, vier leichtplastische Schluffe, ein leichtplastischer Ton, acht mittelpastische Tone und zwei ausgeprägt plastische Tone verwendet. Die Böden werden in vier Gruppen eingeteilt, wobei die Gruppen sowohl nach der Korngröße als auch nach mineralogischen Kriterien eingeteilt werden. Für die Adhäsionsversuche verwendet Wilms ein Rahmenschergerät, bei dem in den unteren Rahmen eine Stahlplatte eingesetzt wurde. Der Boden wird auf diese Stahlplatte eingebaut. Die Böden werden im Versuch nicht normal belastet. Die tangentielle Adhäsion bezeichnet Wilms als Klebrigkeit, die als Scherspannung angegeben wird. Sie wird in Abhängigkeit von der Konsistenz für die vier Bodengruppen angegeben. Es werden Scherwiderstände bis ca. 80 kN/m² gemessen. Wilms stellt bei den Böden, die eher als leicht plastisch zu klassifizieren sind, ein Maximum des Scherwiderstandes bei einer Konsistenz von $I_c = \text{ca. } 0,95$ fest. Bei den überwiegend mittel- bis z.T. ausgeprägt plastischen Böden beobachtet Wilms einen zunehmenden Anstieg des Scherwiderstandes mit Zunahme der Konsistenzzahl.

5.1.17 Untersuchungen von Thewes

Thewes [1999] untersucht Aspekte der Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden an sechs Tonen in Versuchen sowohl nach dem ziehenden Trennprinzip (normale Adhäsion) wie auch nach dem scherenden Trennprinzip (tangentielle Adhäsion). Das Versuchsgerät zur Messung der normalen Adhäsion ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

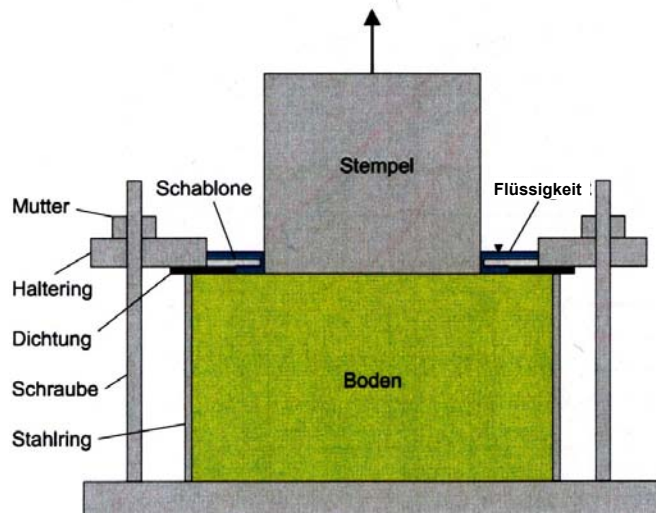


Abbildung 5.12: Adhäsionsversuch [verändert nach Thewes, 1999]

Ein Stahlzylinder wird mit einer definierten Andruckdauer und –kraft auf die Oberfläche des in das Gerät eingebauten Tons aufgedrückt und wieder abgezogen. Thewes benetzt erstmals gezielt die Oberfläche des Tonbodens vor dem Versuch mit Wasser. Es wird eine Abnahme der Adhäsionsspannungen mit zunehmender Benetzungsdauer sowie eine Zunahme der Adhäsionsspannungen mit zunehmender Andruckdauer und mit zunehmender Konsistenzzahl I_C festgestellt. In einem Versuch wird eine normale Adhäsionsspannung von 208 kN/m^2 gemessen (Abbildung 5.13).

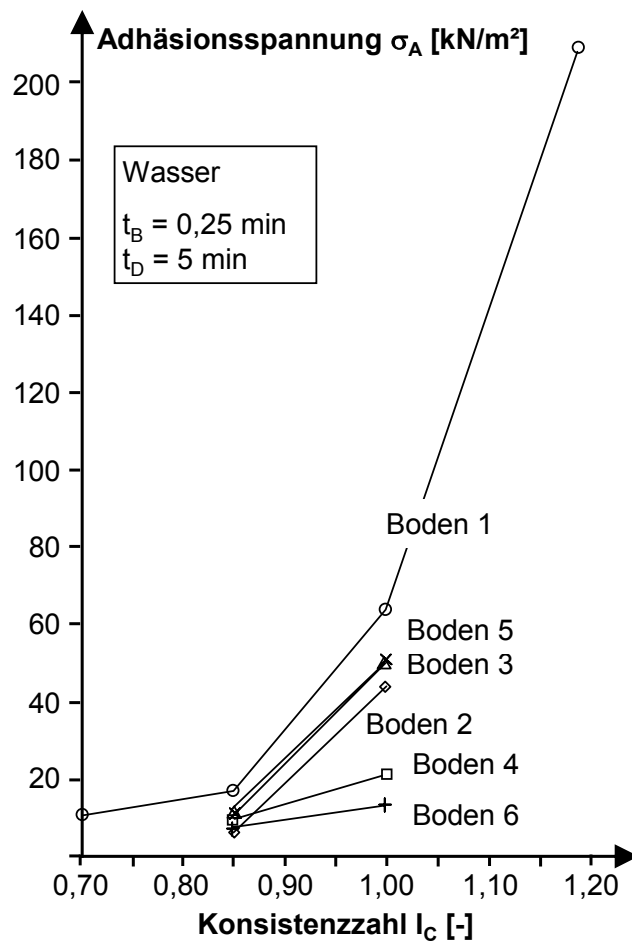


Abbildung 5.13: Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Konsistenz der Versuchsböden [verändert nach Thewes, 1999]

Weiterhin werden Versuche durchgeführt, bei denen Zusatzstoffe zum Benetzungswasser zugegeben wurden (Tabelle 5.4). Die Zugabe von Kaliumchlorid und eines Tensides zum Benetzungswasser verringern die Adhäsionsspannungen z.T. über 50 % im Vergleich zu Wasser als Benetzungsflüssigkeit. Die Zugabe von Bentonit verändert die Adhäsionsspannungen kaum. Die Zugabe der Polymere hingegen erhöht die Adhäsionsspannungen um bis zu ca. 50 % deutlich (Abbildung 5.14).

Tabelle 5.4 Zusätze zum Benetzungswasser [verändert nach Thewes, 1999]

Zusatzstoff	Zusatzmenge (M - %)	Bemerkung
Bentonit	4 %	Bentonitsuspension
Kaliumchlorid (KCL)	4 %	Elektrolytlösung
Tensid (T)	0,2 %	Tensid mit Schaumverhinderer
Carboxymethylcellulose (CMC)	0,4 %	Polymerspülung
Partially Hydrolyzed Polyacrylamide (PHPA)	0,4 %	Polymerspülung

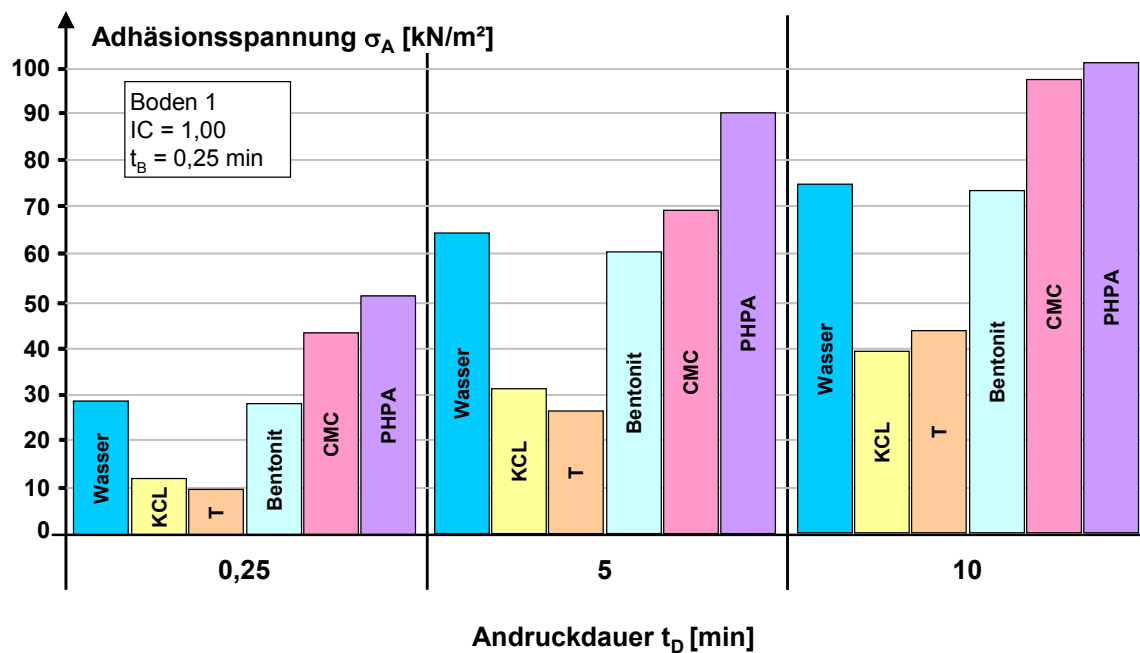


Abbildung 5.14: Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Benetzungsflüssigkeit [verändert nach Thewes, 1999]

Thewes [1999] verknüpft die Ergebnisse der Versuche nach dem ziehenden Trennprinzip und nach dem scherenenden Trennprinzip über das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium miteinander. Ein physikalischer Zusammenhang kann darüber aber nicht abgeleitet werden. Jedoch findet Thewes [1999] einen qualitativen Zusammenhang zwischen den Schwerwiderständen und den Adhäsionskräften derart, dass bei großen Adhäsionskräften auch große Schwerwiderstände und bei kleinen Adhäsionskräften kleine Schwerwiderstände beobachtet werden.

Weiterhin werden die Ergebnisse der Adhäsionsversuche in Bezug zu bodenmechanischen Kennwerten gesetzt. Dabei werden Beziehungen zwischen der Adhäsion und

- dem Anteil der Kornfraktion $d < 2 \mu\text{m}$,
- dem Massenanteil von Illit und Montmorillonit,
- der Plastizitätszahl,
- der undrainierten Kohäsion,
- der Aktivitätszahl,
- der Methylenblauaufnahme,
- der spezifischen Oberfläche,
- der Quellsfähigkeit und
- der Wasseraufnahme

aufgestellt. Die Adhäsionsspannungen steigen dabei mit zunehmendem Massenanteil an Illit und Montmorillonit, der undrainierten Kohäsion, der Methylenblauaufnahme und der Quellfähigkeit. Setzt man die Adhäsionsspannungen in Bezug zur Porenziffer e , wird näherungsweise eine lineare Zunahme dieses Wertes mit der Plastizitätszahl beobachtet. Eine Korrelation mit der Aktivitätszahl, der spezifischen Oberfläche und der Wasseraufnahme wird nicht festgestellt.

Aus der Auswertung von Erfahrungen mit Verklebungen bei Schildvortrieben und den jeweiligen Böden beschreibt Thewes [1999], ähnlich dem Ansatz von Schlick [1989], ein Verklebungspotenzial in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Konsistenzzahl (Abbildung 5.15). Dabei wird zwischen geringem, mittlerem und hohem Verklebungspotenzial unterschieden. Hohes Verklebungspotenzial wird definiert durch starke Behinderungen beim Vortrieb und tägliche Reinigungsarbeiten, mittleres Verklebungspotenzial durch Modifikationen der Schildmaschine und angepasste Betriebsweise (geringe Vortriebsgeschwindigkeiten, lange Spülzeiten) und geringes Verklebungspotenzial durch angepasste Betriebsweise (geringe Vortriebsgeschwindigkeiten, lange Spülzeiten).

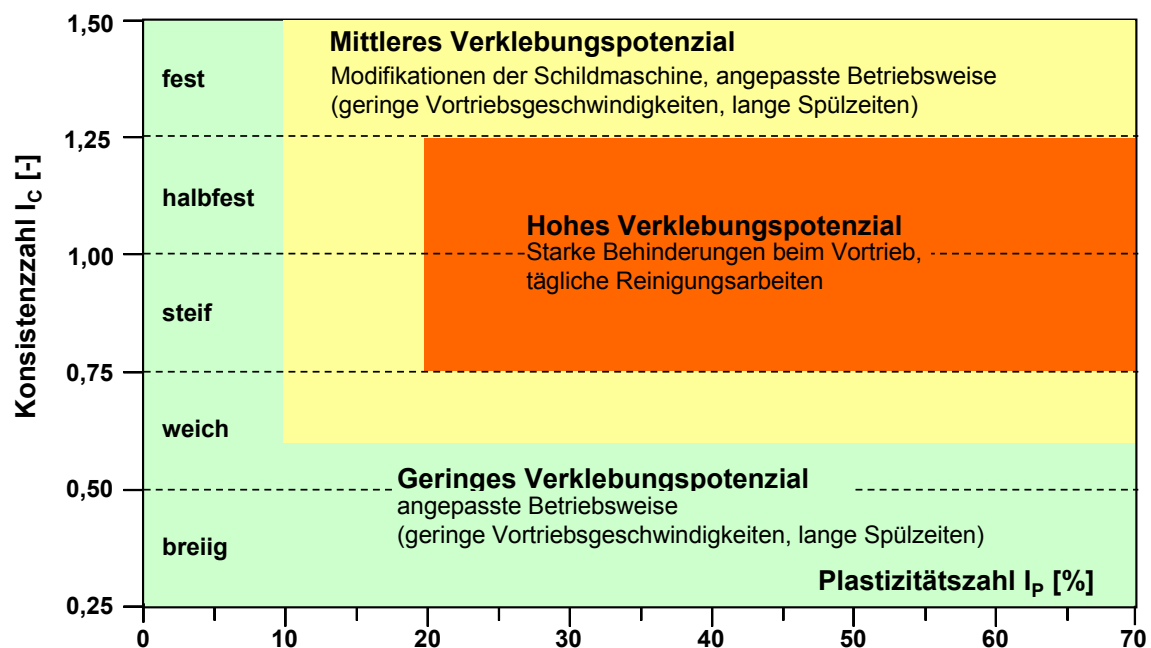


Abbildung 5.15: Verklebungspotenzial für Schildvortriebe
[verändert und ergänzt nach Thewes, 2003]

5.1.18 Untersuchungen von Strauss et al.

Die Untersuchungen von Strauss et al. [2009] werden für bohrtechnische Fragestellungen durchgeführt, lassen sich aber auch auf tunnelbauliche Aufgaben übertragen. Dabei wird das Dispergierungsverhalten bzw. das Agglomerationsverhalten von Tonproben untersucht. Dazu

werden Tonproben in einen zylindrischen Behälter mit Wasser bzw. Spül- oder Stützflüssigkeiten, die z.T. mit Additiven versetzt wurden, gegeben. In den Behälter werden Metallkugeln zugegeben und die Behälter anschließend liegend gerollt. Das Maß der Dispergierung bzw. das Maß der Agglomeration der Tonproben wird festgestellt. Dabei wurde beobachtet, dass die Tone auch an den Oberflächen der Metallkugeln anhaften.

5.1.19 Weitere Arbeiten zur Haftung von kugelförmigen Feststoffen

Die Arbeiten von [Naidich & Lavrinenko, 1965], [Katzuyuki et al, 1974], [O'Brian & Hermann, 1971] beschreiben ähnlich den vorgenannten Arbeiten die Haftung zwischen kugelförmigen Feststoffpartikeln untereinander oder an ebenen Oberflächen unter Wirkung der Kapillarkräfte und Randspannungen durch eine Flüssigkeitsbrücke.

5.1.20 Weitere Arbeiten zur Untersuchung des Anhaftens von Böden nach einem scherenden Trennprinzip

Kooistra [1998], Zimnik [1999], Subba Rao et al. [2002], Hammound et al. [2006] untersuchen das Anhaften von Böden an Festkörperoberflächen nach dem scherenden Trennprinzip. Kooistra [1999] findet einen Zusammenhang zwischen dem Scherwiderstand und dem Wassergehalt, wobei er ein Maximum des Scherwiderstandes im Bereich der Ausrollgrenze feststellt. Zimnik [199] stellt einen Zusammenhang zwischen der Rauigkeit der Festkörperoberfläche, der Andruckdauer und der mineralogischen Zusammensetzung fest. Subba Rao et al. [2002] berichten über ein Schergerät zur Messung von Adhäsion zwischen Böden und Festkörperoberflächen. Die Versuchsergebnisse zeigen eine Zunahme des Scherwiderstandes mit der Rauigkeit. Außerdem wird der Unterschied zwischen normal- und überkonsolidierten Böden untersucht. Für die Untersuchung des Scherwiderstandes von Bohrpfählen untersuchen Hammound et al. [2006] das Scherverhalten zwischen Böden und Festkörperoberflächen. Die Versuche zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Scherwiderstand und der Rauigkeit der Festkörperoberfläche.

Weitere Versuche, bei denen das Anhaften von Boden nach einem scherenden Trennprinzip untersucht wird, werden von Söhne [1953], Stafford [1977] und Hendrick [1982] berichtet. Söhne [1953] und Hendrick [1982] setzen dafür ein Kreisringschergerät ein.

5.2 Zusammenfassung der Literatur über Versuche zur Messung von Adhäsion an Festkörperoberflächen

Seit dem Anfang des 19. Jahrhunderts wird das Anhaften von Böden an Werkstoffoberflächen untersucht. Von vielen Autoren wird in jüngerer Vergangenheit dafür aufgrund der Verfügbarkeit

der Messeinrichtungen mit einem modifizierten Rahmenschergerät das scherende Trennprinzip eingesetzt (Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5 Übersicht über experimentelle Arbeiten zum Anhaften von Böden an Werkstoffoberflächen

Autor	Jahr	Versuchsprinzip	
		Ziehend	Scherend
Schübler	1838	x	
Haberlandt	1879	x	
Schachbasian	1890	x	
Fontaine	1954	x	
Nichols	1925 - 1930		x
Söhne	1953		x
Fontaine	1954	x	
Potyondy	1961		x
Riek	1963	x	x
Littleton	1976		x
Stafford	1977		x
Hendrick	1982		x
Schlick	1989	x	
Beretitsch	1992		x
Hollinderbäumer & Hoberg	1994		x
Wilms	1995		x
Kooistra	1998		x
Zimnik	1999		x
Thewes	1999	x	x
Subba Rao	2002		x
Hammound et. al.	2006		x

Die Randbedingungen der Versuche sind meist so unterschiedlich, dass ein Vergleich der Versuchsergebnisse nur qualitativ möglich ist. Alle Autoren weisen – unabhängig vom Versuchsprinzip - übereinstimmend eine bedeutende Abhängigkeit der Adhäsion vom Wassergehalt (bzw. der Konsistenz), der Plastizität, der Andruckspannung und -dauer nach. In Tabelle 5.6 ist eine Übersicht der wichtigsten experimentellen Arbeiten zusammengestellt.

Tabelle 5.6 Übersicht über die wichtigsten experimentellen Arbeiten

		Schach- basian 1890	Fontaine 1954	Potyondy 1961	Riek 1963	Schlick 1989	Beretitsch 1992	Wilms 1995	Thewes 1999
Ziehendes Trennprinzip: Adhäsionsspannung σ_A [kN/m²]		bis 5,2	bis 28,1	-	bis ca. 21	bis ca. 6	-	-	bis 208
Scherendes Trennprinzip: Scherwiderstand τ_A [kN/m²]		-	-	bis ca. 15	-	-	bis ca. 27	bis ca. 80	bis ca. 25
Anzahl der untersuchten Böden		4	5	4	2	6	3	16	6
Bodenarten		Kaolin, Quarzsand, Humus, Lehm	Ton, Ton/Schluff, Schluff, Mauersand, Sandiger Boden	Ton, Sand und Ton, gebrochener und gemahlener Granit	Verwitterter Lias α und Löß, verwitterter Stubensandstein	tonige, sandige Schluffe, sandige Schluffe, tonige, schluffige Sande	leichtplastischer Schluff, leichtplastische Ton mittelplastischer Ton	sandiger Schluff bis ausgeprägt plastischer Ton	Fünf ausgeprägt plastische Tone, ein ausgeprägt plastischer Schluff
Einflüsse aus Boden	Korngrößenverteilung	-	-	A	(A)	A	A	(A)	A
	Plastizitätszahl I_P	-	-	A	-	A	A	A	A
	Tonkorngehalt	-	-	A	(A)	A	A	A	A
	Mineralog. Zusammens.	-	-	-	-	-	-	-	A
	Kationenaustauschkap.	-	-	-	-	-	-	-	A
	Quelleigenschaften	-	-	-	-	-	-	-	A
	Reibungswinkel			A	-	-	-	-	A
	Kohäsion	-	-	A	-	A	-	-	A
	Wassergehalt w	V	-	V	V	V	V	(V)	V
	Konsistenzzahl I_C	-	-	V	-	(V)	(V)	V	V
	Porenwasserdruck	-	V	-	-	-	-	-	-
Werkstoff	Rauhigkeit	V, qual	-	D, qual.	V	-	-	-	D
	Material	V	V	V	V	D	D	D	D
	Form				V				
Versuchsparameter	Andruckspannung	V	D	V	V	V	V	-	V
	Andruckdauer	D	D	k.A.	-	V	V	-	V
	Benetzungsflüssigkeit	-	V	-	-	-	-	-	V
	Benetzungsdauer	-	-	-	-	-	-	-	V
	Trenngeschwindigkeit	-	-	-	-	V	V	A	-
	Trenndauer	-	-	-	V	-	-	-	-
	Temperatur	-	-	-	V	-	-	-	-

A: angegeben

V: variiert

V,qual: variiert, Angabe qualitativ

D: definiert

D,qual.: definiert, Angabe qualitativ

(...) Wert ableitbar

6 Adhäsionsmessgerät und -verfahren

6.1 Versuchsprinzip

Auf der Grundlage der Überlegungen zum maßgebenden Haftmechanismus (siehe Kap. 2.5) sind die Adhäsionskräfte auf den Kapillardruck des Flüssigkeitsfilmes in der Grenzfläche zwischen dem Boden und der Werkstoffoberfläche zurückzuführen. Der Kapillardruck kann aber nur normal zu den Oberflächen der adhärierenden Stoffe wirken, so dass für die Adhäsionsversuche der ziehende Trennmechanismus (siehe Kap. 2.3) gewählt wurde. Die zu messende Trennkraft entspricht dabei der maximalen Zugkraft, welche eindeutig gemessen und interpretiert werden. Eine entsprechende Empfehlung gibt auch Thewes [1999].

6.2 Adhäsionsmessgerät

Für die Adhäsionsversuche wurde ein Adhäsionsmessgerät bzw. -verfahren verwendet, welches in seinem Aufbau und Abmessungen dem bereits von Thewes [1999] verwendeten Versuchsgerät bzw. -verfahren entspricht. In der Aus- bzw. Durchführung wurden jedoch einige Veränderungen vorgenommen. Es besteht im Wesentlichen aus einem stählernen Probenring, in den der zu untersuchende Boden eingebaut wird. Der Probenring wird mit einer stählernen Kopfplatte auf einer stählernen Grundplatte fixiert. Der Durchmesser des Probenrings beträgt 9 cm, die Höhe 4,9 cm. Zum Messen der Adhäsionskraft wird ein Adhäsionstestzylinder verwendet, der die Werkstoffoberfläche simuliert. Der Innendurchmesser des Adhäsionstestzylinders beträgt 6,2 cm, die Querschnittsfläche beträgt $30,2 \text{ cm}^2$. Das Adhäsionsmessgerät ist in Abbildung 6.1 im Querschnitt und in Abbildung 6.2 im Foto (montiert und demontiert) dargestellt.

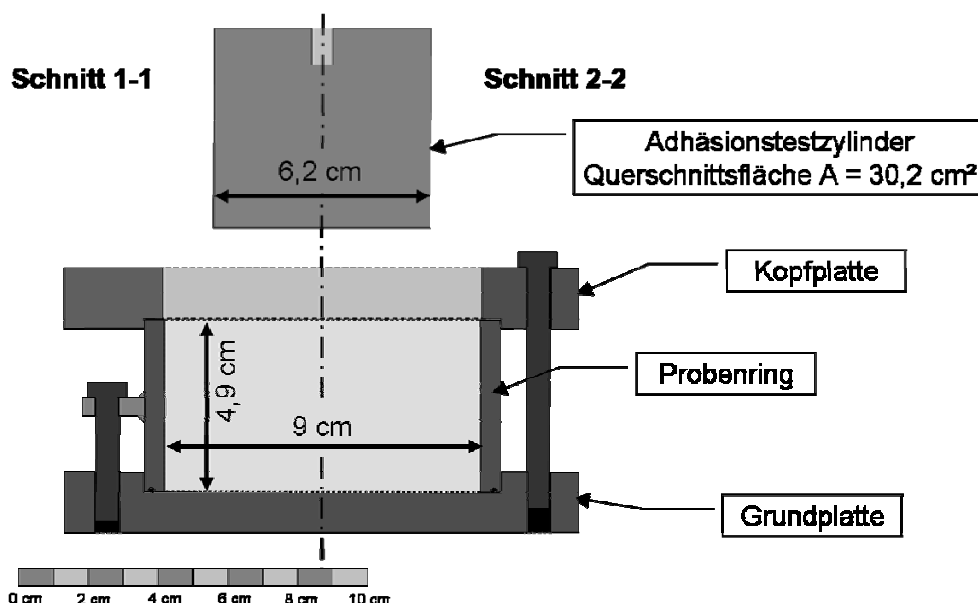


Abbildung 6.1: Querschnitte 1-1 und 2-2 durch das Adhäsionsmessgerät



Abbildung 6.2: Adhäsionsmessgerät und Adhäsionstestzylinder

Zur Untersuchungen des Einflusses des Werkstoffes und der Oberflächenrauigkeit auf die Adhäsionskräfte wurden fünf verschiedene Adhäsionstestzylinder eingesetzt. Drei der Zylinder besitzen eine Stahloberfläche mit unterschiedlichen Rauigkeiten, ein Zylinder wurde verchromt und einer aus PTFE (Teflon) gefertigt (Tabelle 6.1 und Abbildung 6.3).

Tabelle 6.1 Adhäsionstestzylinder und Rauigkeit

Material	Rauigkeit Rz [μm]
Stahl, feinpoliert	0,1
Stahl, poliert	9,8
Stahl, gedreht	17,3
Stahl, chrombeschichtet	0,7
PTFE (Teflon)	6,6



Stahl

Rz = 0,1 / 9,8 / 17,3 µm



Stahl, chrombeschichtet

Rz = 0,7 µm



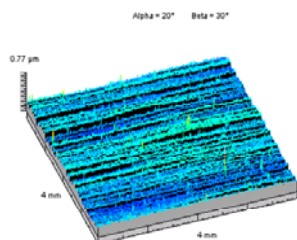
PTFE (Teflon)

Rz = 6,6 µm

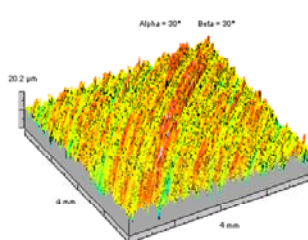
Abbildung 6.3: Adhäsionstestzylinder

Erläuterungen der Begriffe zur Oberflächenbeschreibung von Werkstoffen und zur Definition der Rauigkeit sind in Anhang E und Anhang F enthalten.

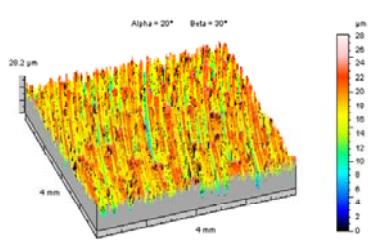
Die Rauigkeiten der Adhäsionstestzylinder wurden durch die Staatliche Materialprüfanstalt, Abt. Oberflächentechnik der TU Darmstadt untersucht. Die entsprechenden Prüfprotokolle sind in Anhang F beigefügt. Die durch die Staatliche Materialprüfanstalt erstellten Visualisierungen der Oberflächenbeschaffenheiten sind in Abbildung 6.4 dargestellt.



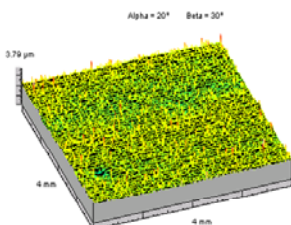
Stahl, feinpoliert
Rz = 0,1 µm



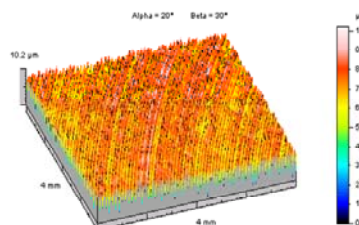
Stahl, poliert
Rz = 9,8 µm



Stahl, gedreht
Rz = 17,3 µm



Stahl, chrombeschichtet
Rz = 0,7 µm



PTFE (Teflon)
Rz = 6,6 µm

Abbildung 6.4: Visualisierungen der Oberflächenbeschaffenheiten der Adhäsionstestzylinder

Die stählernen Adhäsionstestzylinder wurden in den Versuchspausen gereinigt und in Öl gelagert, um Korrosion an den Oberflächen zu vermeiden. Vor den Versuchen wurden die Oberflächen der Zylinder jeweils mit Aceton gereinigt.

6.3 Adhäsionsmessverfahren

Der Adhäsionsversuch wird zeitlich in mehrere Phasen unterteilt (Abbildung 6.5). Zunächst wird der Boden in den Probenring unter definierten Einbaukennwerten wie Wassergehalt, Konsistenz und Verdichtungsenergie eingebaut. Die Verdichtung des Bodens wurde entsprechend einem Proctorversuch gewählt, da dieses Verfahren eine reproduzierbare Verdichtung ergibt, vergleichsweise einfach anzuwenden und weltweit anerkannt ist.

Zur Messung der Adhäsionsspannung σ_A wird der Adhäsionstestzylinder mit einer definierten Normalspannung (Andruckspannung σ_D) und einer definierten Zeit (Andruckphase D, Andruckdauer t_D) auf die Bodenoberfläche gedrückt und mit einer definierten Trenngeschwindigkeit v_T von 5 mm/min in der Trennphase (T) wieder abgezogen. Die Geschwindigkeit wurde aus den Erfahrungen der Versuche von Thewes [1999] gewählt. Die maximale Zugkraft, die zum Abziehen des Adhäsionstestzylinders erforderlich ist, wird als Adhäsionskraft F_A definiert. Diese wird über die Querschnittsfläche des Adhäsionstestzylinders in die Adhäsionsspannung σ_A umgerechnet. Zwischen der Andruckphase und der Trennphase musste technisch bedingt eine kurze Phase eingeführt werden, in der der Testzylinder spannungslos ist und nur dessen Eigengewicht wirkt. Diese Phase wird als Eigengewichtsphase (E) definiert.

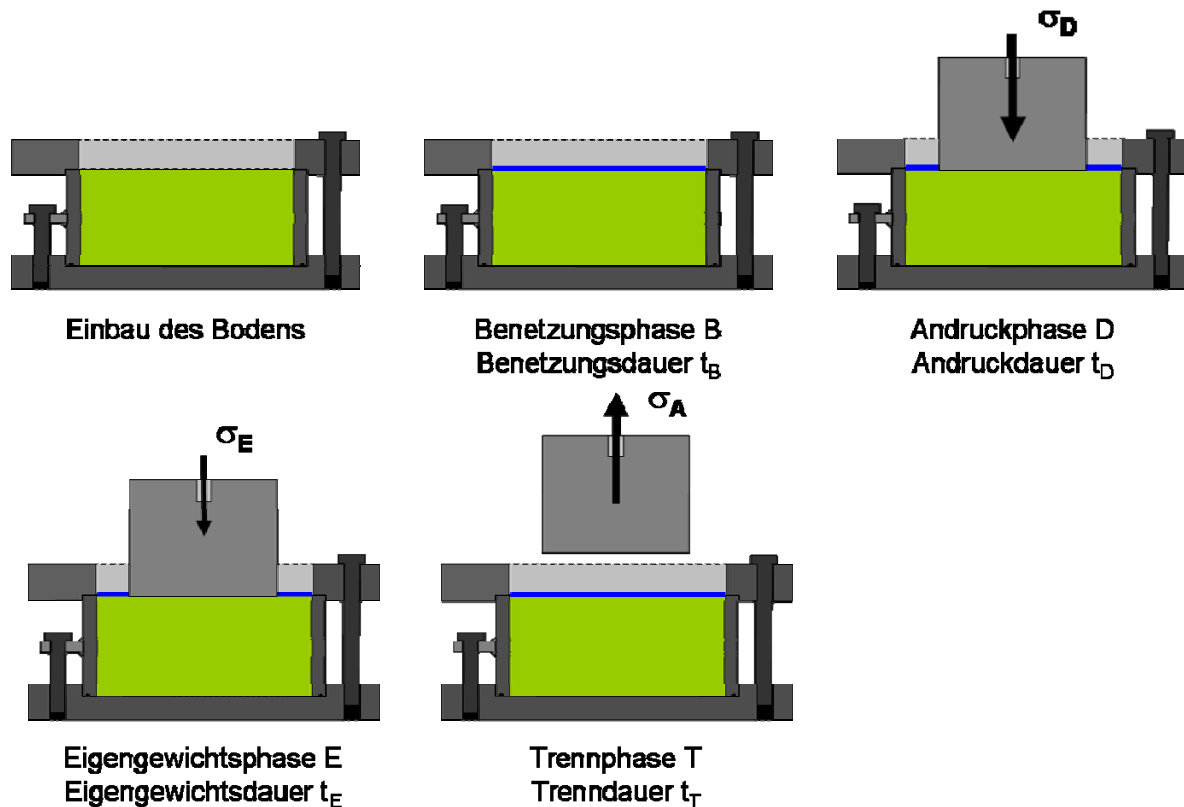


Abbildung 6.5: Versuchsphasen

Die Oberfläche des Tons kann vor dem Andrücken des Adhäsionstestzylinders entsprechend gezielt mit einer Flüssigkeit benetzt werden. Die Zeit zwischen Benetzung der Oberfläche und dem Andrücken des Adhäsionstestzylinders wird als Benetzungsphase (B) mit der Benetzungsdauer t_B definiert. Als Flüssigkeit wurde bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen entionisiertes Wasser verwendet. Hier kann aber auch jede andere Flüssigkeit, z.B. eine Bentonitsuspension eingesetzt werden. Die Menge des Wassers betrug dabei in allen Versuchen 2,5 ml, die mit einer Pipette nach dem Einbau des Gerätes in die Prüfpresse (siehe unten) auf die Probenoberfläche aufgebracht wurde.

Zur Auswertung wird die Adhäsionsspannung über die Versuchsdauer auftragen und die maximale Zugspannung ermittelt. Ein charakteristischer Versuchsverlauf ist in Abbildung 6.6 schematisiert dargestellt.

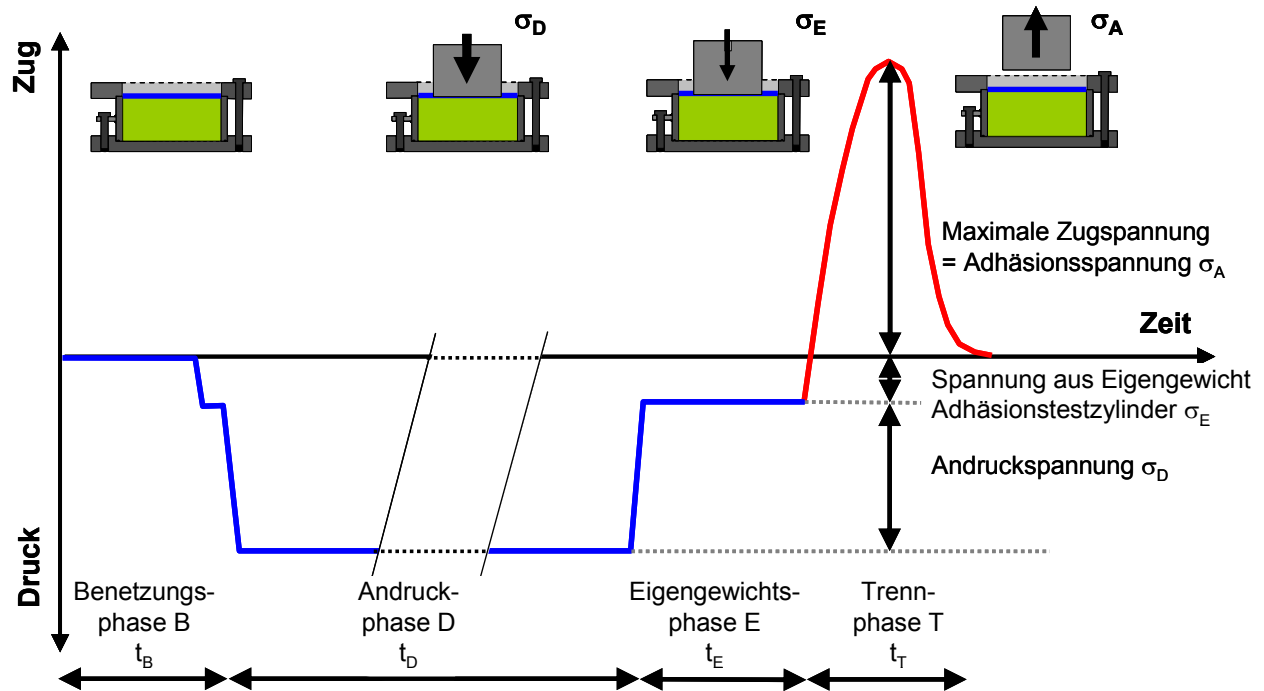


Abbildung 6.6: Charakteristischer Versuchsverlauf

Exemplarisch für einen solchen Versuchsverlauf sind in Abbildung 6.7 die Versuchsergebnisse von Versuchsreihen am Versuchston KI-W (siehe Kap. 7.2.2) für drei verschiedene Konsistenzen $I_c = 0,85$, $I_c = 0,95$ und $I_c = 0,97$ dargestellt. Dabei ist der Versuchsabschnitt ab dem Ende der Eigengewichtsphase E wiedergegeben.

Für das Andrücken und das anschließende Abziehen des Adhäsionstestzylinders wird das Versuchsgerät in eine Prüfpresse eingebaut, die sowohl für Druck- als auch für Zugversuche eingerichtet ist. Es muss eine konstante Trenngeschwindigkeit möglich sein. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde die Prüfpresse des Institutes für Angewandte Geowissenschaften durch Einbau einer zusätzlichen Kraftmessdose für Zug- und Druckmessungen so modifiziert, dass diese Anforderung gewährleistet wurde (Abbildung 6.8).

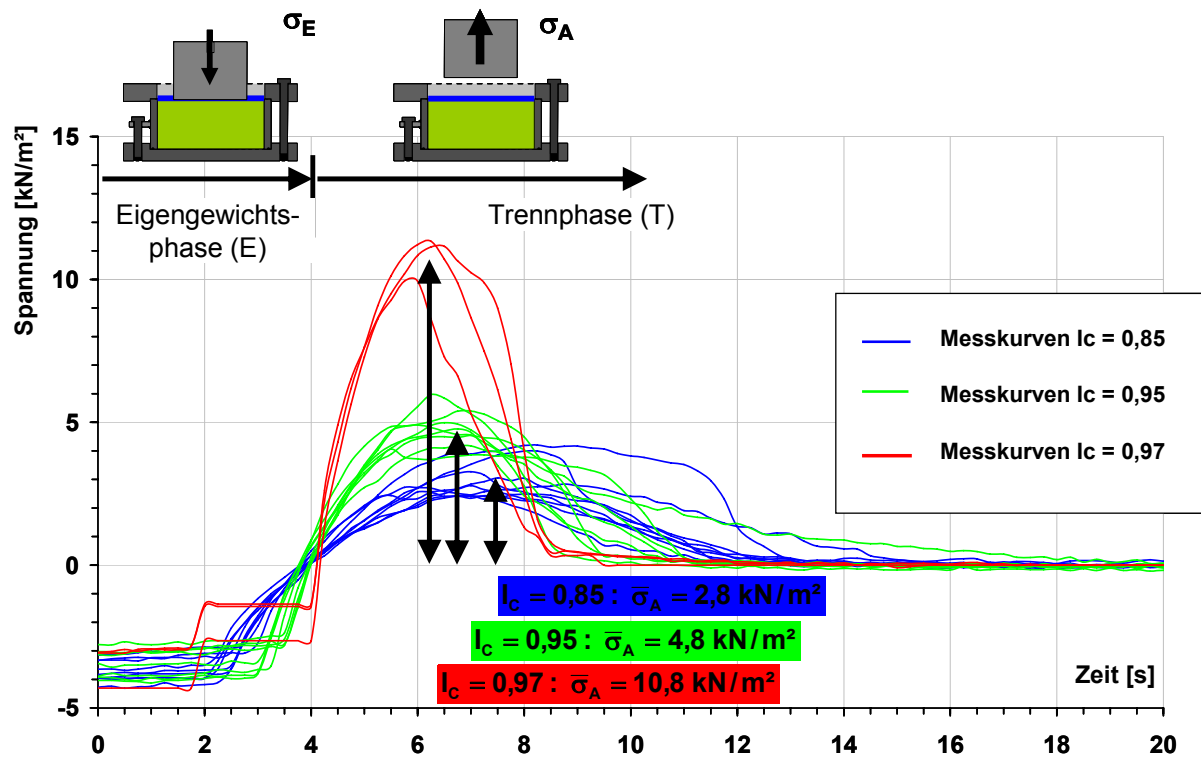


Abbildung 6.7: Ergebnisse von Adhäsionsversuchen am Versuchston KI-W (feinpolierter Adhäsionstestzylinder ($\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$, $t_B = 1 \text{ min}$, $t_D = 1 \text{ min}$, $t_E = 30 \text{ s}$))

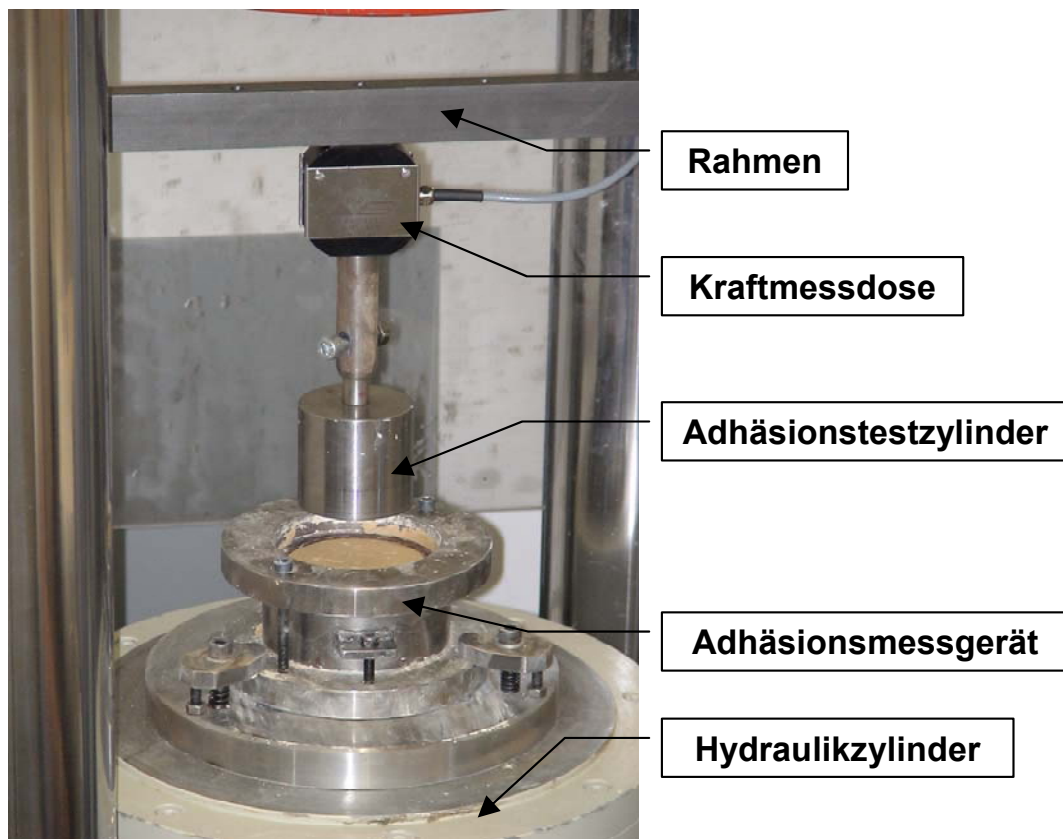


Abbildung 6.8: Adhäsionsmessgerät und Adhäsionstestzylinder in der Prüfpresse

Zu beachten sind bei diesem Versuchsprinzip (ziehender Trennmechanismus) allerdings Trennbrüche, die nicht in der Fuge zwischen den Stoffen, sondern in einem der beiden Stoffe - ggf. auch lokal - stattfinden, da dann dort die Adhäsion größer als die Zugfestigkeit des gebrochenen bzw. gerissenen Stoffes ist (Abbildung 6.9). Daher ist unbedingt die Oberfläche der Bodens bzw. des Werkstoffes nach dem Abziehen zu prüfen: Ist die Oberfläche frei oder weitgehend frei von Anhaftungen, ist davon auszugehen, dass Adhäsionskräfte gemessen wurden. Haften an der Oberfläche hingegen noch Reste des abgezogenen Stoffes an, so sind die Adhäsionskräfte nicht klar von der Zugfestigkeit des abgezogenen Stoffes zu trennen.

Nach jedem Versuch wurde die Oberfläche des Adhäsionstestzylinders mit Wasser gespült und anschließend mit Aceton gereinigt, so dass von gleichmäßiger Sauberkeit des Adhäsionstestzylinders ausgegangen werden kann.



Abbildung 6.9: Trennbruch in der Bodenprobe

6.4 Vorbereitung und Einbau des Bodens in den Probenring

Zur Erzielung reproduzierbarer Versuchsergebnisse muss der Boden homogene Eigenschaften aufweisen. Die Homogenität hängt wesentlich von der Behandlung des Bodens, also der Vorbereitung und dem Einbau der Proben in den Probenring ab. Diesem Prozess kommt daher entscheidende Bedeutung zu. Dabei kommt es wesentlich darauf an, einen standardisierten Bearbeitungsprozess einzuhalten, der reproduzierbare Ergebnisse gewährleistet.

Zunächst muss für eine Versuchsreihe der gewünschte Wassergehalt, bzw. die gewünschte Konsistenz eingestellt werden. Dazu wird dem Boden, ausgehend vom vorhandenen Wassergehalt, die entsprechende zusätzliche oder überschüssige Wassermenge entweder zugeführt oder entnommen. Da die Entwässerung eines Tons schwierig zu steuern ist, hat es sich bewährt, die erforderliche Wassermenge zuzuführen. Für die anschließend erforderliche

Homogenisierung des Tons hat sich die Verwendung eines handelsüblichen Fleischwolfes als sehr zweckmäßig herausgestellt (Abbildung 6.10).



Abbildung 6.10: Homogenisierung eines Versuchstons

Sollen an dem Boden mehrere Versuche durchgeführt werden, ist eine entsprechende Probenmenge vorzubereiten, wobei Teile des Tons nach einem Versuch auch wiederverwendet werden können. Der Boden ist in einem dicht verschließbaren Probenbehälter aufzubewahren um Veränderung des Wassergehaltes durch Verdunstung zu vermeiden. Insbesondere wenn eine Vielzahl von Versuchen geplant ist, deren Durchführung mehrere Tage in Anspruch nimmt, muss der Boden so gelagert werden, dass eine Veränderung der Konsistenz ausgeschlossen ist. Bei Tönen, die quellfähige Tonminerale enthalten, müssen zwischen der Aufbereitung und dem Einbau in den Probenring etwa 24 h vergehen, damit die Quellprozesse stattfinden können.

Anschließend wird der Boden in den Probenring in drei Lagen eingebaut (Abbildung 6.11, links) und entsprechend dem Proctorversuch nach DIN 18127, mit jeweils 25 Schlägen auf einer Lage verdichtet (Abbildung 6.11, rechts). Für die Versuche wurde ein Proctorhammer mit 2,5 kg Gewicht und 30 cm Fallhöhe gewählt. Dies entspricht einer volumenbezogenen Verdichtungsarbeit $A_{Pr} \approx 1,8 \text{ MNm/m}^3$. Diese volumenbezogene Verdichtungsarbeit liegt zwischen der Verdichtungsarbeit der einfachen Proctordichte von $A_{Pr} \approx 0,6 \text{ MNm/m}^3$ und der modifizierten Proctordichte von $A_{Pr} \approx 2,7 \text{ MNm/m}^3$.

Wie in Kap. 10 noch ausgeführt wird, sind die obersten Millimeter des Tons sehr entscheidend für die Entwicklung der Adhäsionskräfte, so dass nur mit einer standardisierten Behandlung der Oberfläche vergleichbare Versuchsergebnisse zu erwarten sind. Der Ton wird dazu so eingebaut, dass er zunächst über den Probenring hinaus steht. Nach dem Einbau des Tons wird

die Kopfplatte abgenommen und der über den Probenring hinaus stehende Ton so entfernt, dass die Oberfläche des Tons bündig zum Probenring ist. Dies wird in zwei Bearbeitungsschritten vorgenommen. Zunächst wird z.B. mit einem Messer der Ton grob abgeschnitten (Abbildung 6.12).



Abbildung 6.11: Einbau und Verdichtung eines Versuchstons mit dem Proctorhammer



Abbildung 6.12: Grobes Abschneiden des überstehenden Tons

Der Ton muss danach noch einige Millimeter über den Probenring überstehen. Anschließend wird im zweiten Bearbeitungsschritt die Tonoberfläche mit einem Haarlineal bis auf die Höhe des Probenringes abgezogen und geglättet (Abbildung 6.13). Der Schneidenwinkel des Abzieheisens beträgt 40° . Die Oberfläche des Tons wird durch drei- bis fünfmaliges, jeweils

kreuzweises Abziehen mit dem Haarlineal so geglättet, bis eine ebene, homogene Oberfläche entsteht. Nach jedem Abzug muss die Schneide von anhaftendem Ton gesäubert werden. Das Abzieheisen wird so geführt, dass der überstehende Ton mit der abgewinkelten Schneidenfläche auf die Oberfläche gedrückt wird.

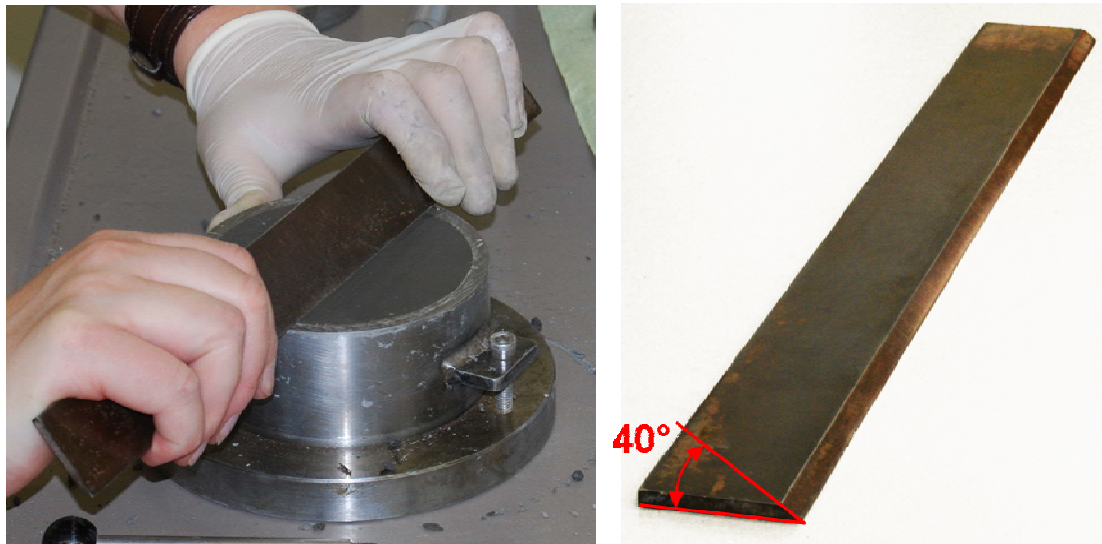


Abbildung 6.13: Abziehen der Oberfläche und Haarlineal

Dieser Bearbeitungsprozess hat sich in Vorversuchen als sinnvoll herausgestellt, da hierbei eine homogene Oberfläche erzeugt werden kann. Versuche, bei denen die Tonoberfläche schneidend im Sinne eines Abschneidens oder Abhobeln nach einem schälenden Trennprinzip (Kap. 2.3) geglättet werden sollte, waren nicht zielführend. Die Tonoberfläche riss hierbei jedes Mal unkontrollierbar und unreproduzierbar auf. Der Versuch, den Ton mit einem dünnen, hochfesten, gespannten Draht, der über den Probenring geführt wurde, zu bearbeiten, war ebenfalls Weise erfolglos. Die Verwendung eines Messers mit einer gekrümmten Schneide führte zu einer konkaven Form der Tonoberfläche. Diese Methoden wurden daher verworfen. Es wurde auch versucht, die Oberfläche mit einer Metallplatte drehend zu glätten. Hier ergaben sich Unregelmäßigkeiten in der Tonoberfläche durch Anhaftungen des Tons an der Metallplatte bei deren Entfernen.

6.5 Homogenität des Einbaus

Die Feuchtmassen des eingebauten Tons wurden vor den Adhäsionsversuchen an ausgewählten Proben durch Wiegen bestimmt. Exemplarisch sind ausgewählte Schwankungsbreiten der Wägungen im Bezug zum jeweiligen Mittelwert angegeben (Tabelle 6.2). Die Bezeichnungen der Versuchstone sind in Kap. 7 erläutert.

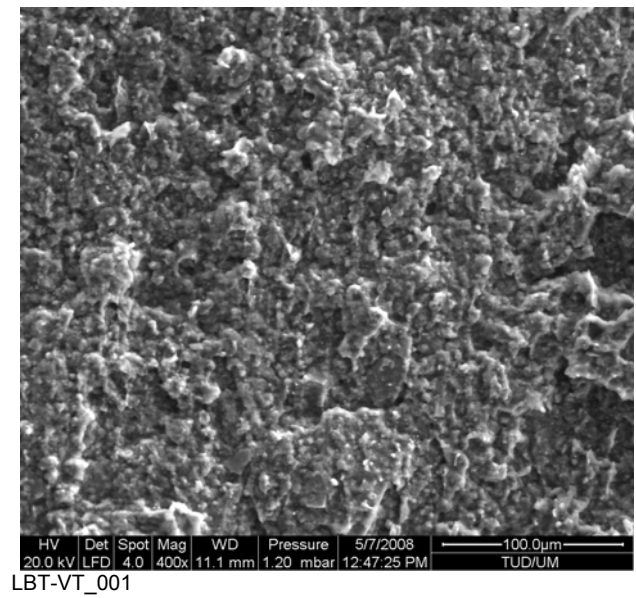
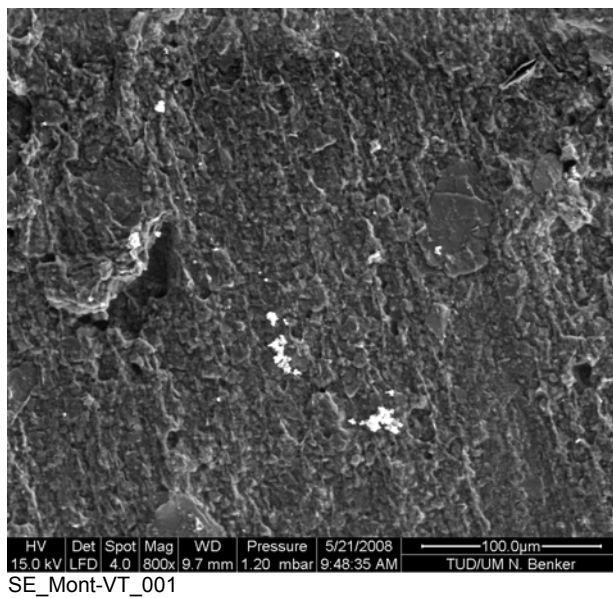
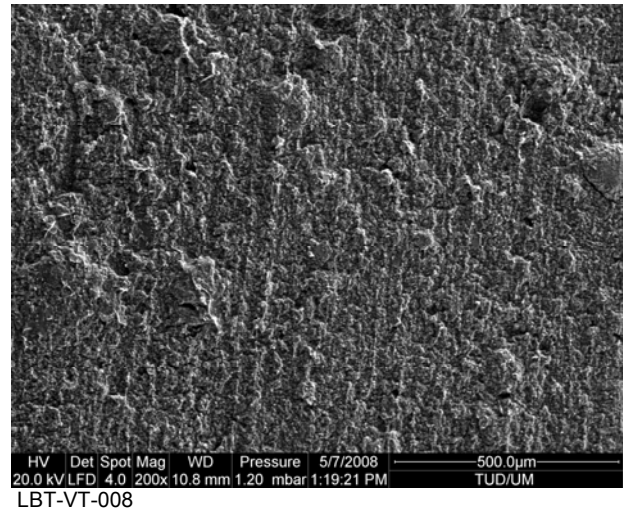
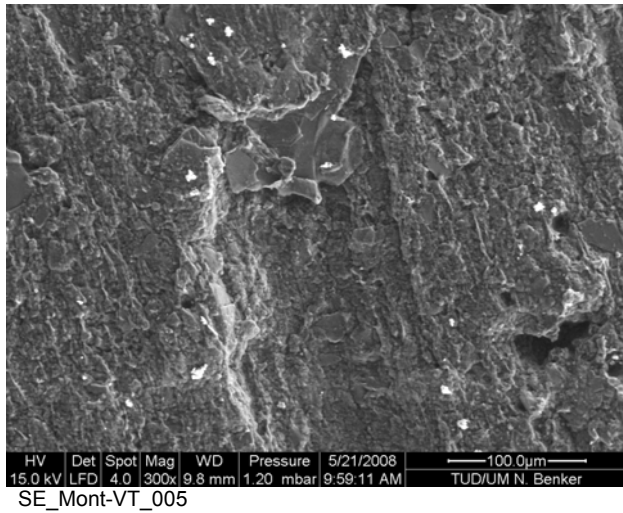
Die Messungen zeigen mit Standardabweichungen von $s < 1 \%$ des jeweiligen Mittelwertes eine gute Reproduzierbarkeit des Einbaus.

Tabelle 6.2 Statistische Angaben zum Einbau der Versuchstone

Versuchston	Konsistenz	Anzahl der Versuche	Mittelwert der Feuchtmasse	Standardabweichung	Standardabweichung in % des Mittelwertes
	I_c [-]	n [-]	m_f [g]	s [g]	s/m_f [%]
KI-S	0,85	2	623,2	0,9	0,1
	0,95	2	645,9	1,1	0,2
	1,00	2	648,1	2,7	0,4
KI-W	0,85	2	574,6	0,9	0,2
	0,95	2	592,6	0,6	0,1
	1,10	2	597,4	0,8	0,1
ISK-E	0,88	2	489,2	1,2	0,2
	1,03	2	516,0	2,3	0,4
SI-B	0,85	2	497,3	2,5	0,5
	0,95	2	526,6	1,1	0,2
	1,00	2	545,5	3,3	0,6

6.6 Orientierung der Tonpartikel

Da, wie bereits erwähnt, die Oberfläche der Tonprobe und damit auch die Orientierung der Tonpartikel, eine wesentliche Rolle für die Adhäsionskräfte spielt, wurde die Oberfläche der Tonproben mit dem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM, siehe hierzu Anhang B) untersucht. Exemplarisch sind in Abbildung 6.14 die Oberflächen der Versuchstone SI-B und ISK-E (Kap. 7) nach der Vorbereitung der Oberfläche dargestellt. Die Oberflächen zeigen deutliche Spuren des Abziehens mit dem Haarlineal. Die Tonpartikel werden durch den Verdichtungsvorgang und das Abziehen aber offenbar parallel zur Oberfläche eingeregelt.



Versuchston SI-B

Versuchston ISK-E

Abbildung 6.14: Oberflächen der Versuchstone SI-B und ISK-E nach der Bearbeitung der Oberflächen

Die ESEM-Aufnahmen zeigen, dass mit dem beschriebenen Bearbeitungsverfahren – abhängig vom gewählten Betrachtungsmaßstab - keine homogene Oberfläche im physikalischen Sinne erzielbar ist. Die Aufnahmen zeigen allerdings, dass die Inhomogenitäten gleichmäßig verteilt und auch reproduzierbar sind, so dass von jeweils vergleichbaren Oberflächen ausgegangen werden kann.

7 Versuchstone

7.1 Auswahl der Versuchstone

Für die Adhäsionsversuche wurden vier Versuchstone verwendet. Die Versuchstone wurden im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten u.a. bodenmechanisch und röntgenographisch untersucht und klassifiziert (Hug [2006], Hempel, [2008], Kowalew [2008], Deecke [2008], Breuer [2009]).

Zwei dieser Tone sind industriell aufbereitete, sehr homogene Tone. Einflüsse auf die Ergebnisse der Adhäsionsversuche aus Schwankungen der Zusammensetzung der Tone sollen dadurch ausgeschlossen werden. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse im Hinblick auf die Zusammensetzung des Tons ist somit gewährleistet. Bei diesen Tönen handelt es sich um einen von Kaolinit- und Illittonmineralen dominierten Ton aus dem Westerwald [Hug, 2006, Hempel, 2008] und einen von Smektit- (Montmorillonit) und Illittonmineralen dominierten Ton aus Bayern [Kowalew, 2008].

Bei den beiden anderen Versuchstonesen handelt es sich zum einen um einen Ton, der aus Kernbohrungen zum Zwecke der Baugrunderkundung für einen Schildvortrieb in Norddeutschland [Deecke, 2008] entnommen wurde und zum anderen um einen Tonstein aus einem Tunnelvortrieb in Stuttgart [Breuer, 2009]. Der Versuchston aus Norddeutschland wird von Illit-, Smektit- und Kaolinittonmineralen, der Tonstein aus Stuttgart wird von Kaolinit- und Illittonmineralen dominiert. Mit diesen Versuchstonesen wird die Anwendbarkeit des Adhäsionsversuches unter Projektbedingungen untersucht.

Die Versuchstone wurden systematisch nach ihren dominierenden Tonmineralen und ihrer Herkunft bezeichnet (Tabelle 7.1). In Anhang A sind die wesentlichen Eigenschaften von Tonen und Tonmineralen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7.1 Systematik der Bezeichnung der Versuchstone

Versuchston	Dominierende Tonminerale	Herkunftsort	Zustand
KI-S	<u>K</u> aolinit, <u>I</u> llit	<u>S</u> tuttgart	Handstücke aus Tunnelvortrieb
KI-W	<u>K</u> aolinit, <u>I</u> llit	<u>W</u> esterwald	Pulverförmige Sackware
ISK-E	<u>I</u> llit, <u>S</u> mektit, <u>K</u> aolinit	<u>E</u> msland	Bohrkerne aus Kernbohrungen
SI-B	<u>S</u> mektit, <u>I</u> llit	<u>B</u> ayern	Pulverförmige Sackware

7.2 Herkunft und mineralogische Zusammensetzung der Versuchstone

7.2.1 Versuchston KI-S

Der Versuchston KI-S wurde aus einem stark verwitterten, entfestigten und zersetzten Tonstein bzw. Tonmergelstein des Lias α , der im Rahmen des Vortriebs des Fasanenhof-Tunnels in Stuttgart ausgebrochen wurde, gewonnen. Die Tonsteinproben sind stratigrafisch dem Angulatensandstein des Hettangium 2 (Alte Bezeichnung: Lias α_2) und dem Pylonotenton des Hettangium 1 (Alte Bezeichnung: Lias α_1) zuzuordnen. Dieser Ton enthält nach der Röntgenbeugungsanalyse (Abbildung 7.1) vorwiegend Kaolinit und Illit als Tonminerale. Aufgrund der Asymmetrie und der Breite des Peaks bei 10 Å sind auch quellfähige Tonmineralphasen enthalten. Über die Methylenblauaufnahme dieses Tons von 8,1 ml/g wurde eine Kationenaustauschkapazität von ca. 14 meq/100 g abgeschätzt. Dazu wurde die von Ludwig [1993] bestimmte Kationenaustauschkapazität eines dem Versuchston SI-B vergleichbaren Tons (Calcigel) als Referenz verwendet.

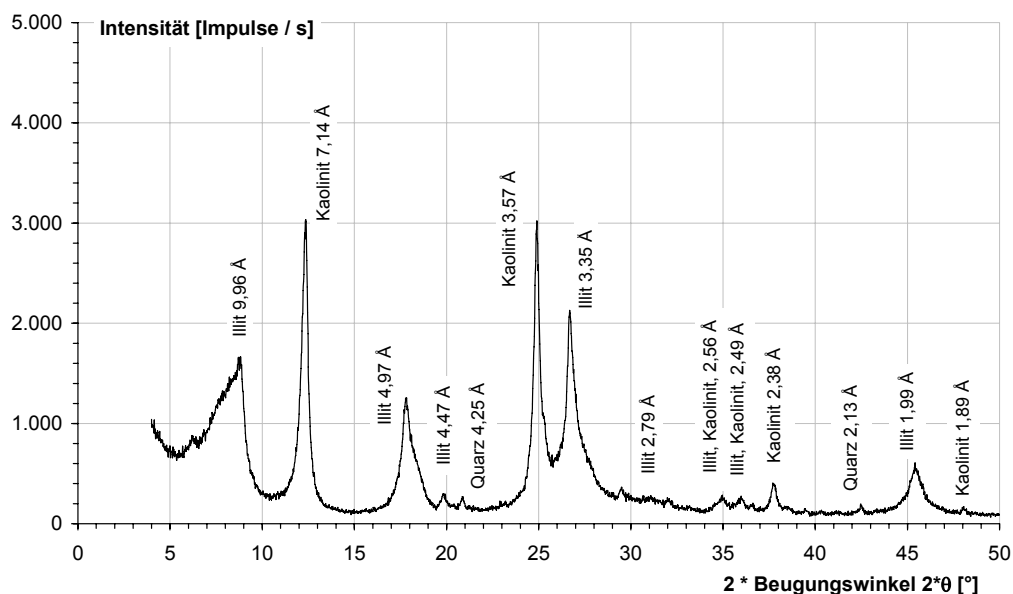
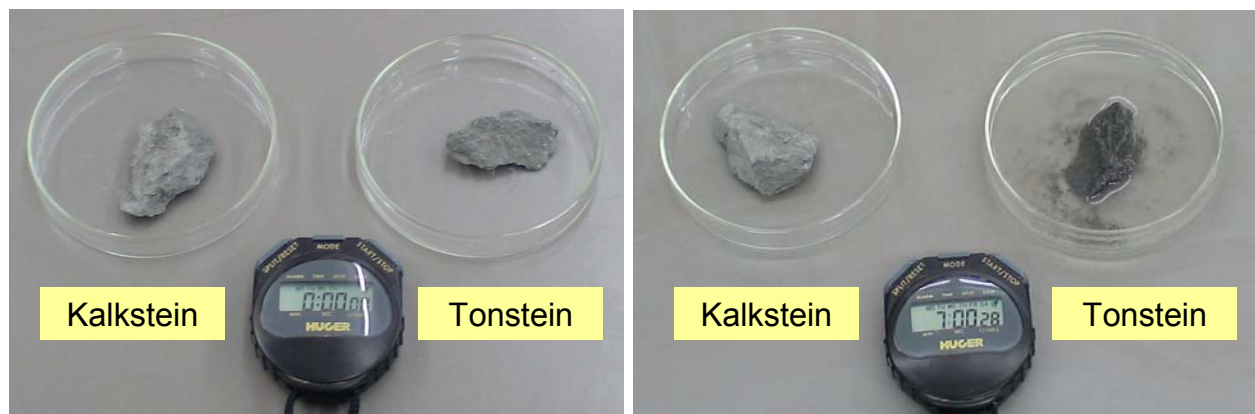


Abbildung 7.1: Röntgendiffraktogramm Versuchston KI-S (Texturpräparat der Tonfraktion)

Dieser Ton zeigte im Wasserlagerungsversuch (DIN 4022) deutliche Veränderungen (Abbildung 7.2) und ist somit als veränderlich festes Gestein zu klassifizieren.

Zur Verwendung für die Adhäsionsversuche wurde der Tonstein, ähnlich der Situation bei einem Tunnelvortrieb mit Erddruckstützung, verbreitet. Dazu wurde der Tonstein grob zerkleinert und anschließend unter Zugabe von Wasser in einem Fleischwolf zu einem Tonboden verarbeitet.

Die vereinzelt in dem Tonstein enthaltenen, nicht veränderlichen Kalksteinstücke (Abbildung 7.2) wurden aussortiert.



Vor Wasserlagerung

Nach 7 h Wasserlagerung

Abbildung 7.2: Versuchston KI-S, Tonstein und Kalkstein in Wasserlagerung

7.2.2 Versuchston KI-W

Bei dem Versuchston KI-W handelt es sich um einen pulverförmigen, industriell aufbereiteten, als Sackware gelieferten Ton der Fa. Erbslöh Lohrheim GmbH aus Lohrheim. Dieser Ton enthält nach der Röntgenbeugungsanalyse (Abbildung 7.3) vorwiegend Kaolinit und Illit als Tonminerale. Über die Methylenblauaufnahme dieses Tons von 3,1 ml/g wurde eine Kationenaustauschkapazität von ca. 5 meq/100 g abgeschätzt. Dazu wurde die von Ludwig [1993] bestimmte Kationenaustauschkapazität eines dem Versuchston SI-B vergleichbaren Tons (Calcigel) als Referenz verwendet. Dieser Wert liegt im üblichen Bereich für solche Tone [von Soos, 2001; Jasmund & Lagaly, 1993; Heim, 1990]. Quellfähige Tonminerale sind nach diesen Ergebnissen nicht enthalten.

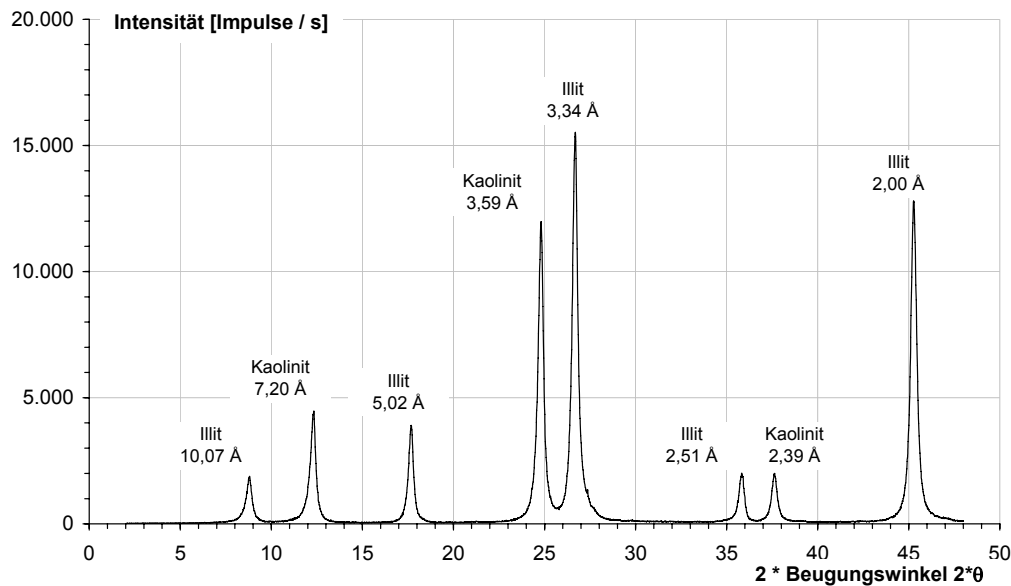


Abbildung 7.3: Röntgendiffraktogramm Versuchston KI-W (Texturpräparat der Tonfraktion)

7.2.3 Versuchston ISK-E

Bei dem Versuchston ISK-E handelt es sich um einen aus Bohrkernen gewonnenen Tonboden, die im Rahmen der Baugrunderkundung für einen Gasdüker unter der Ems zwischen Delfzijl und Knock abgeteuft wurden. Der Tonboden wurde vom Ingenieurbüro Grundbauingenieure Steinfeld & Partner GbR, Hamburg, zur Verfügung gestellt. Bei den untersuchten Proben handelt es sich ausschließlich um die Tonfazies der Schichten des Lauenburger Tons. Für die Adhäsionsversuche stand vergleichsweise wenig Probenmaterial zur Verfügung.

Dieser Ton enthält nach der Röntgenbeugungsanalyse (Abbildung 7.4) vorwiegend Illit, Smektit und Kaolinit als Tonminerale. Über die Methylenblauaufnahme dieses Tons von 19,2 ml/g wurde eine Kationenaustauschkapazität von ca. 32 meq/100 g abgeschätzt. Dazu wurde die von Ludwig [1993] bestimmte Kationenaustauschkapazität eines dem Versuchston SI-B vergleichbaren Tons (Calcigel) als Referenz verwendet. Das Vorhandensein quellfähiger Tonminerale wird dadurch zusätzlich bestätigt. In Quellversuchen, die im Rahmen der Baugrunderkundung für das Projekt von Steinfeld & Partner [2008] durchgeführt wurden, wurden dementsprechend Quelldehnungen bis 6,1 % und Quelldrücke bis 550 kN/m² gemessen.

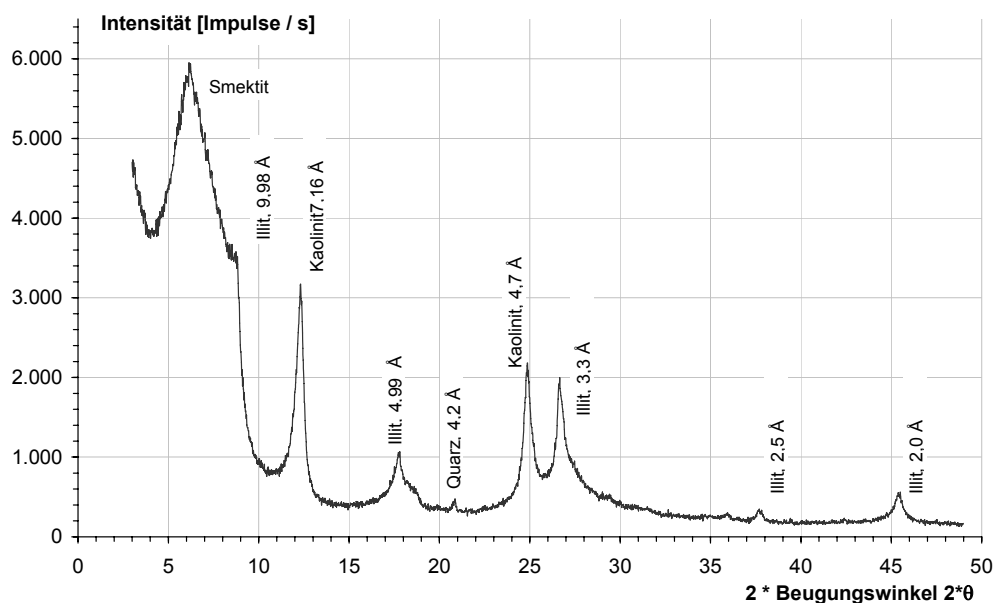


Abbildung 7.4: Röntgendiffraktogramm Versuchston ISK-E (Texturpräparat der Tonfraktion)

Dieser Ton weist einen Glühverlust von ca. 12,4 % auf und ist damit als organischer Boden einzustufen. Wenn die organischen Bestandteile eines Tonbodens die Tonminerale ummanteln, kann die Wasseraufnahmefähigkeit eines Tonbodens erheblich reduziert werden. Diesen Effekt bezeichnet man als „organic coating“ (Dubbin et al., 2000). Zur Abschätzung des Gehaltes an organischen Bestandteilen wurden daher der Gehalt an organischem Kohlenstoff (Total Organic Carbon (TOC)) durch Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehaltes (Total Carbon (TC)) und des Gehaltes des mineralisch gebundenen Kohlenstoffs (Total Inorganic Carbon (TIC)) bestimmt (Tabelle 7.2). Der organisch gebundene Kohlenstoffgehalt beträgt danach ca. 3,7 %. Der Glühverlust kann damit teilweise durch einen Verlust an in Tonmineralen kristallin gebundenem Wasser durch die hohen Temperaturen bei der Glühverlustbestimmung erklärt werden.

Tabelle 7.2 Gesamtkohlenstoffgehalt (TC), mineralisch gebundener Kohlenstoff (TIC) und organischer Kohlenstoffgehalt (TOC) des Versuchstons ISK-E

Gesamter Kohlenstoffgehalt	Mineralisch gebundener Kohlenstoffgehalt	Organisch gebundener Kohlenstoffgehalt
TC [%]	TIC [%]	TOC [%]
4,31	0,60	3,71

7.2.4 Versuchston SI-B

Bei dem Versuchston SI-B handelt es sich um einen pulverförmigen, industriell aufbereiteten, als Sackware gelieferten Ton der Fa. Süd-Chemie AG, München mit der Handelsbezeichnung Calcigel. Nach den Angaben im Datenblatt handelt es sich um einen Bentonit, der vorwiegend

Calcium als austauschbare Zwischenschichtkationen enthält. Dieser Ton enthält nach der Röntgenbeugungsanalyse (Abbildung 7.5) vorwiegend Smektit (Montmorillonit) und Illit als Tonminerale. Die Kationenaustauschkapazität wurde mit der von Ludwig [1993] bestimmten Kationenaustauschkapazität eines dem Versuchston SI-B vergleichbaren Tons (Calcigel) als Referenz zu ca. 70 meq/100g abgeschätzt.

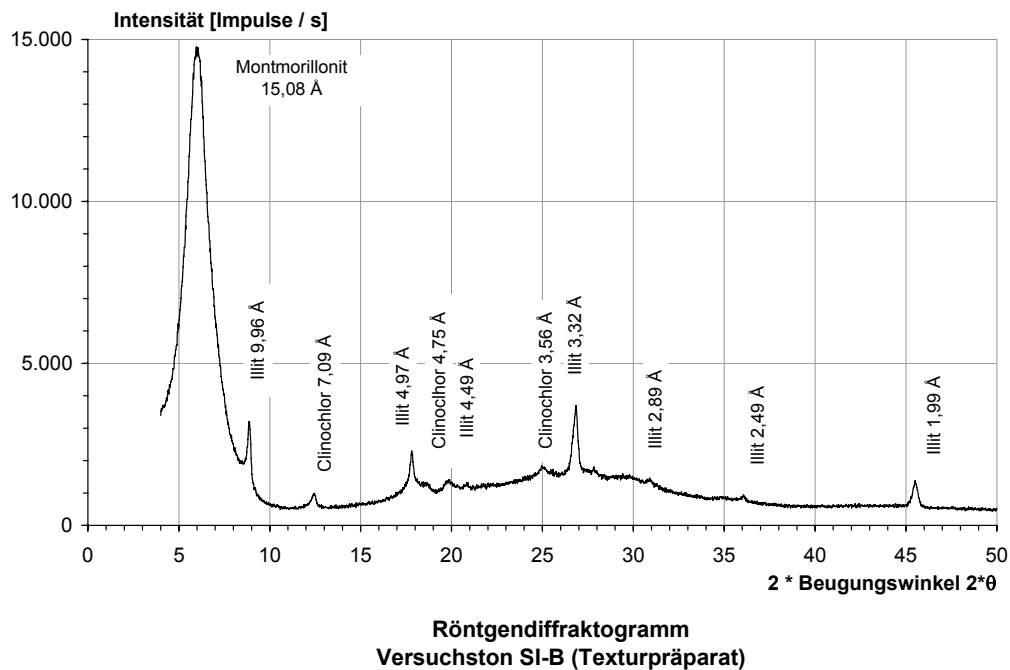


Abbildung 7.5: Röntgendiffraktogramm Versuchston SI-B (Texturpräparat der Tonfraktion)

7.3 Bodenmechanische Kennwerte

Zur Klassifizierung der Versuchstone wurden die Korndichte ρ_s , die Zustandsgrenzen, die Wasseraufnahme w_A sowie die Plastizitätszahl I_P bestimmt. Außerdem wurden der Kalkgehalt v_{Ca} und der Glühverlust v_{gl} ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Die Aktivitätszahl I_A nach Skempton [1953] wurde mit der Plastizitätszahl I_P und dem Gehalt an Tonkorn ermittelt, wobei der Tonkorngehalt näherungsweise mit dem Gehalt der Kornfraktion $d < 0,002$ mm abgeschätzt wurde. Die Versuchstone KI-W und KI-S sind mit Aktivitätszahlen $I_A < 0,75$ als inaktiv zu charakterisieren. Der Versuchston ISK-E ist mit einer Aktivitätszahl $I_A = 0,81$ als normal aktiv und der Versuchston SI-B mit einer Aktivitätszahl $I_A = 1,70$ als aktiv zu bezeichnen.

Tabelle 7.3 Bodenmechanische Kennwerte der Versuchstone

Versuchston	Dominierende Tonminerale	Korndichte [DIN 18124] ρ_s [g/cm ³]	Wassergehalt an der Fließgrenze [DIN 18122-1] w_L [%]	Wassergehalt an der Ausrollgrenze [DIN 18122-1] w_P [%]	Plastizitätszahl [DIN 18122] I_P [%]	Aktivitätszahl nach Skemton I_A [-]	Schrumpfgrenze [DIN 18122-2] w_S [%]	Wasseraufnahme [DIN 18132] w_A [%]	Kalkgehalt [DIN 18129] V_{Ca} [%]	Glühverlust [DIN 18128] V_{gl} [%]
KI-S	Kaolinit, Illit	2,77	34,0	15,5	18,5	0,42	14,5	75,0	12,6	5,9
KI-W	Kaolinit, Illit	2,71	47,8	21,7	26,1	0,48	20,0	65,5	n.n.	5,5
ISK-E	Illit, Smektit, Kaolinit	2,68	95,0	38,5	56,5	0,81	23,8	127,0	4,5	12,4
SI-B	Smektit (Montmorillonit), Illit	2,78	117,2	31,8	85,4	1,70	18,5	170,5	2,4	7,2

n.n.: nicht nachweisbar

Die Korngrößenverteilungen der Versuchstone (Abbildung 7.6) wurde nach DIN 18123 durch Sedimentation (Versuchstone KI-W, SI-B, ISK-E) bzw. Siebung und Sedimentation (Versuchston KI-S) bestimmt. Bei den Versuchstonen KI-W, SI-B, ISK-E handelt es sich um Böden mit einem Gehalt an Tonkorn über 50 % und einem Gehalt an Sandkorn von 0% (Versuchstone KI-W und SI-B) bzw. ca. 3 % (Versuchston ISK-E). Der Versuchston KI-S enthält mit ca. 12 % deutlich mehr Sandkorn und mit ca. 42 % deutlich weniger Tonkorn als die drei anderen Versuchstone.

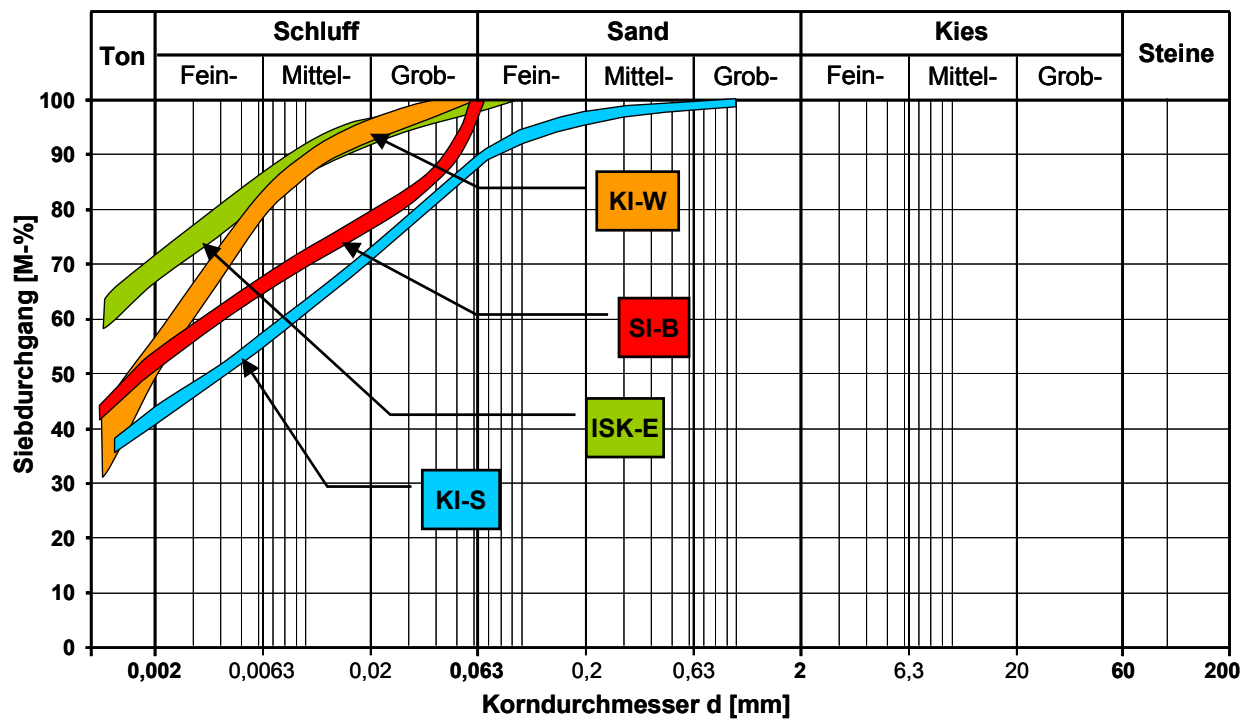


Abbildung 7.6: Korngrößenverteilung der Versuchsteine

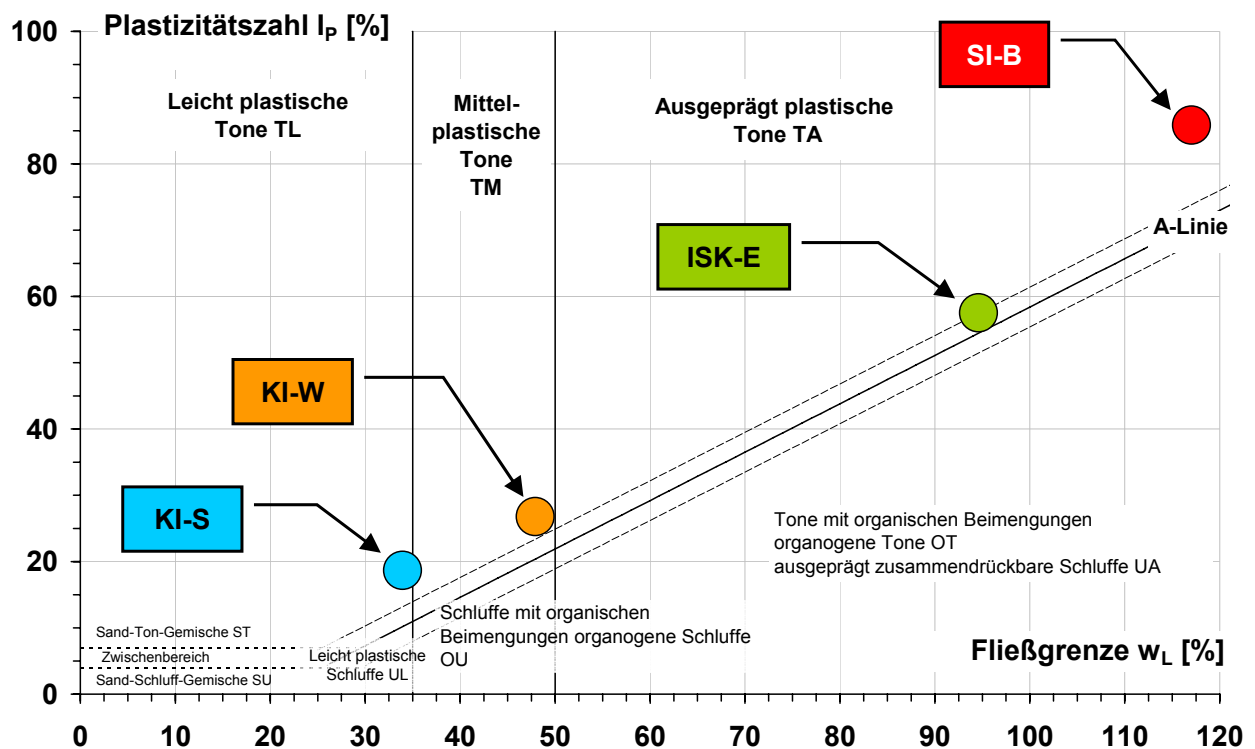


Abbildung 7.7: Plastizitätsdiagramm der Versuchsteine

Nach dem Plastizitätsdiagramm (Abbildung 7.7) sind die Versuchsteine SI-B und ISK-E als ausgeprägt plastische Tone (TA), der Versuchston KI-W als mittelplastischer Ton (TM) und der Versuchston KI-S als leichtplastischer Ton (TL) nach DIN 18196 zu klassifizieren. Der

Versuchston ISK-E liegt nahe der A-Linie an der Grenze zum Ton mit organischen Beimengungen, bzw. zum organogenen Ton, was aufgrund des hohen Glühverlustes bzw. des hohen organischen Kohlenstoffgehaltes auch plausibel ist (Kap. 7.2.3).

Für die Versuchstone KI-W und SI-B wurde darüber hinaus die Zugfestigkeit in Spaltzugversuchen in Anlehnung an die entsprechende Empfehlung der ISRM [1978] sowie an Schick [2005] bestimmt. Die Durchführung der Versuche ist in Anhang C beschrieben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Tabelle 7.4 Spaltzugfestigkeit der Versuchstone KI-W und SI-B

Versuchston	Konsistenzzahl I_c [-]	Spaltzugfestigkeit q_{sz} [kN/m ²]
KI-W	1,00	36,8
SI-B	0,95	60,2

7.4 Permeabilität der Versuchstone

Wie in Kapitel 10 noch ausgeführt wird, hat die Durchlässigkeit der Böden einen erheblichen Einfluss auf ihr Adhäsionsverhalten. Daher wurde die Permeabilität der Versuchstone für verschiedene Konsistenzen mit einem Gasdrucksäulenpermeameter im Rahmen einer Studienarbeit untersucht [Fiedler, 2009].

Mit diesem Verfahren wurde der Versuch unternommen, die Permeabilität von Tonen bei Teilsättigung experimentell mit einem hochleistungsfähigen Verfahren zu ermitteln. Eine Messung inkl. der Vorbereitung und des Einbaus der Probe dauert nur ca. 1 – 4 Stunden.

Beim Gasdruckpermeameter strömt Gas – in diesem Fall Luft - durch eine zylindrische Probe des Versuchstons. Die Durchströmungsrate sowie der Druckunterschied bei Ein- und Ausströmung werden gesteuert, bzw. gemessen. Die Probe wird seitlich zur Vermeidung von Umströmungen mit einer luftdruckbeaufschlagten Membran abgedichtet (Abbildung 7.8). Das Verfahren und das Gerät sind in Hornung & Aigner [2002] und Bär [2008] beschrieben.

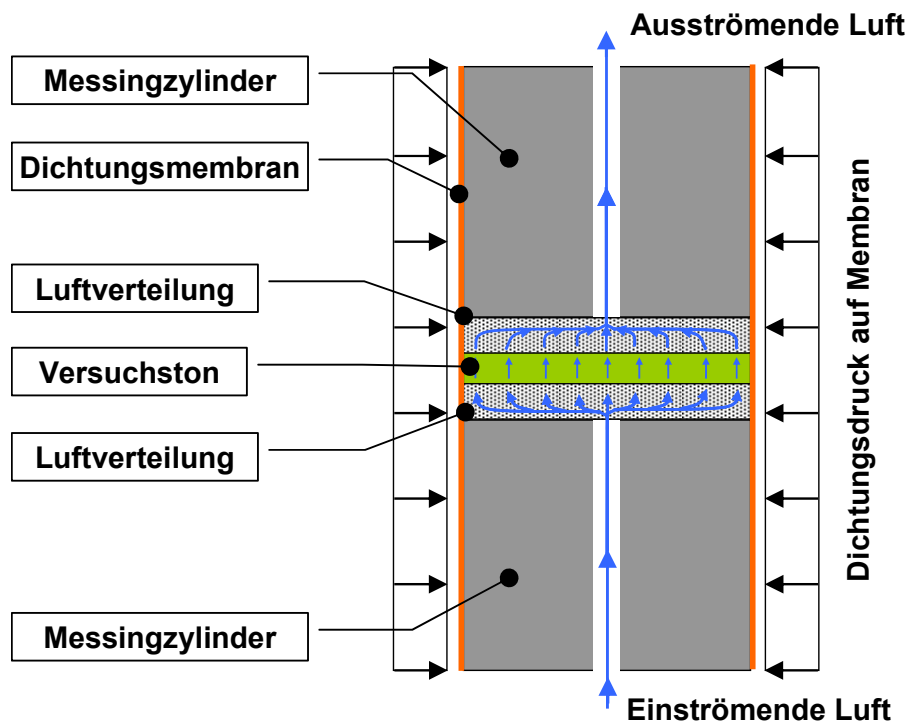


Abbildung 7.8: Versuchsprinzip Gasdrucksäulenpermeameter

Dem Versuch, bzw. der Auswertung liegt das Gesetz von Darcy zugrunde. Dieses gilt sowohl für die viskose Strömung (näherungsweise) inkompressibler Fluide (wie z.B. Wasser), als auch für die Strömung kompressibler Fluide in porösen Feststoffen. Die physikalischen Grundlagen für die Berücksichtigung der Unterschiede im Vergleich zur Strömung eines inkompressiblen Fluides (Kompressibilität, Turbulenz, Gleitströmung) werden von Jaritz [1999] beschrieben.

Die Unterschiede hinsichtlich der Strömung eines inkompressiblen und eines kompressiblen Stoffes werden bei der Auswertung zur Ermittlung der Permeabilität berücksichtigt.

Das Gasdrucksäulenpermeameter wurde ursprünglich zur Messung der Permeabilität von porösen Festgesteinen konzipiert. Da die Permeabilität von Tonen i.A. erheblich geringer ist als die von porösen Festgesteinen, wurde der Messbereich des Gerätes im Bereich geringer Durchströmungsraten für die Messungen an den Versuchstonen erheblich erweitert. Weiterhin waren zahlreiche Vorversuche erforderlich, um die mechanische Stabilität der Tone während des Versuches zu gewährleisten.

Die Permeabilität der Versuchstone wurde für Konsistenzzahlen $I_c = 0,85; 0,95$ und $1,0$ in 12 Versuchsreihen mit insgesamt 44 Einzelversuchen gemessen. Die Versuchstone wurden dazu in einen Probenring mit dem Proctorhammer eingebaut. Die Verdichtungsarbeit entsprach der für den Einbau in das Adhäsionsmessgerät.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 7.9 zusammengestellt. Die Versuchstone KI-W und SI-B zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Konsistenz, wobei die Permeabilität bei einer Konsistenzzahl von $I_c = 1,0$ deutlich ansteigt.

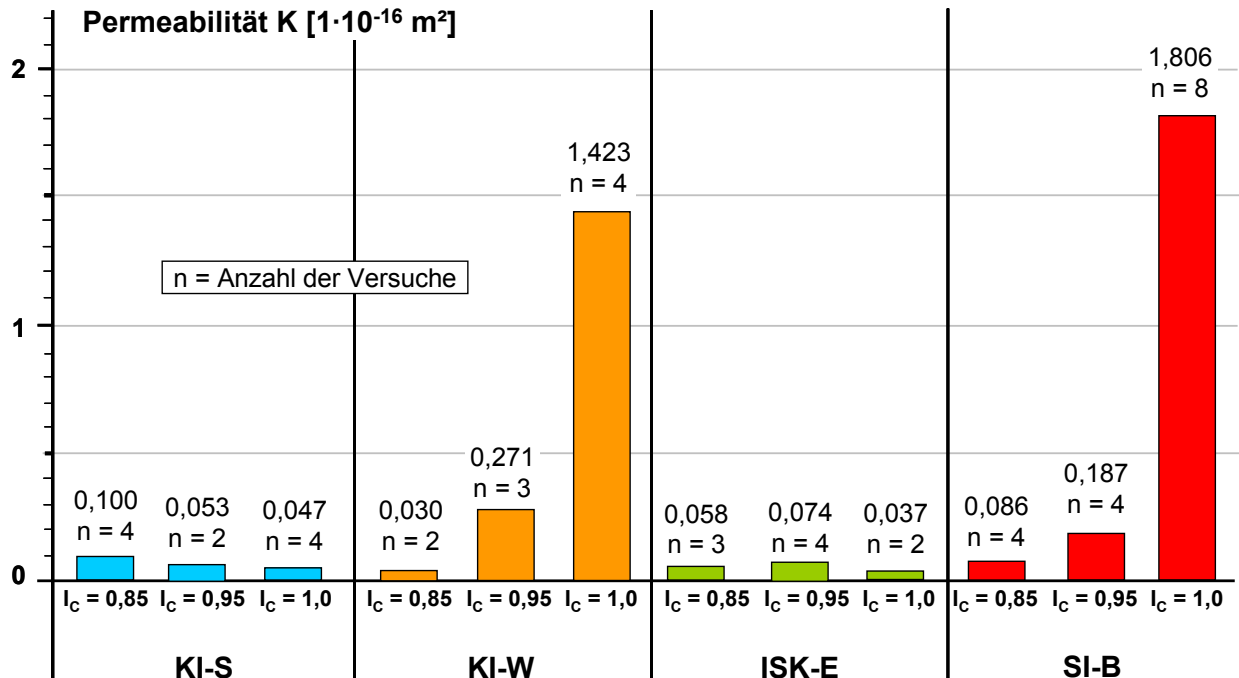


Abbildung 7.9: Permeabilitäten der Versuchstone (n = Anzahl der Versuche)

Die Permeabilitäten der Versuchstone KI-S und ISK-E sind geringer als die der Versuchstone KI-W und BI-B. Sie zeigen auch keine ausgeprägte Abhängigkeit von der Konsistenzzahl.

Die gefundenen Permeabilitäten wurden mit den für diese Konsistenzen ermittelten Sättigungsgraden S_r (Kap. 8.4.1) verglichen (Abbildung 7.10). Es zeigt sich, dass der Sättigungsgrad für alle Versuchstone bei diesen Konsistenzen relativ gleichmäßig ist und zwischen $S_r = 0,79$ und $0,83$ beträgt. Es ist daher davon auszugehen, dass die Permeabilitäten für die verschiedenen Konsistenzahlen jeweils bei etwa gleichem Sättigungsgrad bestimmt wurden.

Die bei Erhöhung der Konsistenzzahl steigende Permeabilität der Versuchstone KI-W und SI-B ist möglicherweise auf eine Homogenisierung der Fließwege (Reduzierung von Ein- und Austrittsverlusten beim Übergang von großen zu kleinen Porenradien und umgekehrt) zurückzuführen. Mit steigender Konsistenzzahl – also bei abnehmendem Wassergehalt – wird die Trockendichte größer (Abbildung 8.11). Möglicherweise wird dadurch der für eine Durchströmung nutzbare Porenraum erweitert, was zu einer Erhöhung der Permeabilität führt.

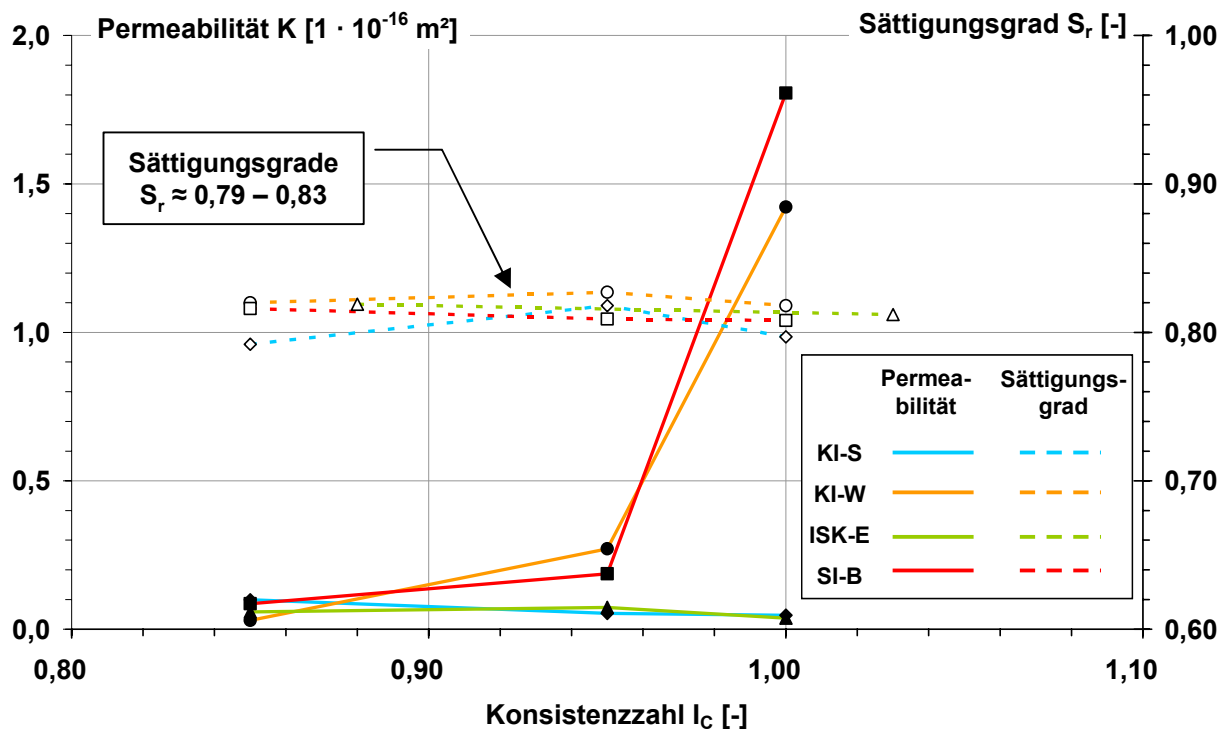


Abbildung 7.10: Permeabilität und Sättigung

Die Schwankungsbreiten der Versuchsergebnisse im Bezug zum jeweiligen Mittelwert sind in Tabelle 7.5 angegeben. Die Messungen zeigen mit Standardabweichungen von i.A. kleiner als 24 % des jeweiligen Mittelwertes eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse. Die beiden Versuchsreihen an den Versuchstonen KI-W und SI-B bei einer Konsistenzzahl $I_c = 0,95$ zeigen mit Standardabweichungen von 263 bzw. 221 % bezogen auf den Mittelwert vergleichsweise große Schwankungen.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass das Verfahren zur Messung der Permeabilität von Tonen erstmalig eingesetzt wurde. Erfahrungen mit der Bewertung der Ergebnisse liegen daher noch nicht vor. Die Absolutwerte der Ergebnisse müssen aus diesem Grunde noch entsprechend vorsichtig bewertet werden. Die Versuchsergebnisse begründen aber die Vermutung, dass die Bestimmung der Durchlässigkeit von Tonen auch bei Teilsättigung mit vergleichsweise geringem Aufwand mit diesem Verfahren möglich ist. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die Unterschiede der Permeabilität zwischen den Versuchstonen einerseits als auch die Zunahme der Permeabilität mit der Konsistenzzahl werden hingegen qualitativ als plausibel beurteilt.

Tabelle 7.5 Statistische Angaben zu den Permeabilitätsmessungen

Versuchston	Konsistenz I_c [-]	Anzahl der Versuche n [-]	Mittelwert der Permeabilität K [$1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$]	Standard- abweichung s [$1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/K [%]
KI-S	0,85	4	0,100	0,021	21,2
	0,95	2	0,053	0,005	8,9
	1,00	4	0,047	0,006	12,0
KI-W	0,85	2	0,030	0,001	4,8
	0,95	3	0,271	0,713	262,9
	1,00	4	1,423	0,342	24,0
ISK-E	0,85	3	0,058	0,002	3,2
	0,95	4	0,074	0,005	6,9
	1,00	2	0,037	0,003	8,7
SI-B	0,85	4	0,086	0,017	19,7
	0,95	4	0,187	0,415	221,6
	1,00	8	1,806	0,134	7,4

8 Adhäsionsversuche

8.1 Allgemein

Die Adhäsionsversuche wurden im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten durchgeführt. Dabei wurde der Versuchston KI-S von Breuer [2009], der Versuchston KI-W von Hug [2006] und Hempel [2008], der Versuchston ISK-E von Deecke [2008] und der Versuchston SI-B von Kowalew [2008] im Hinblick auf deren adhäsive Eigenschaften untersucht.

8.2 Eignungsversuche

Zu Beginn der Adhäsionsversuche wurden zunächst Eignungsversuche zur Untersuchung des Einbauverfahrens (siehe Kap. 6) und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt. Diese wurden mit dem Versuchston KI-W an fünf verschiedenen Konsistenzen $I_C = 0,85 / 0,95 / 0,97 / 1,0 / 1,1$ vorgenommen. Zu jeder Konsistenz wurden 6 - 10 Einzelversuche (3 Einzelversuche bei $I_C = 0,97$) durchgeführt. Alle anderen Testparameter (Andruckspannung und –dauer, Trenngeschwindigkeit, Material und Rauigkeit der Adhäsionstestzylinder, etc.) wurden konstant gehalten. Die Ergebnisse der Einzelversuche sind in Abbildung 8.1 dargestellt.

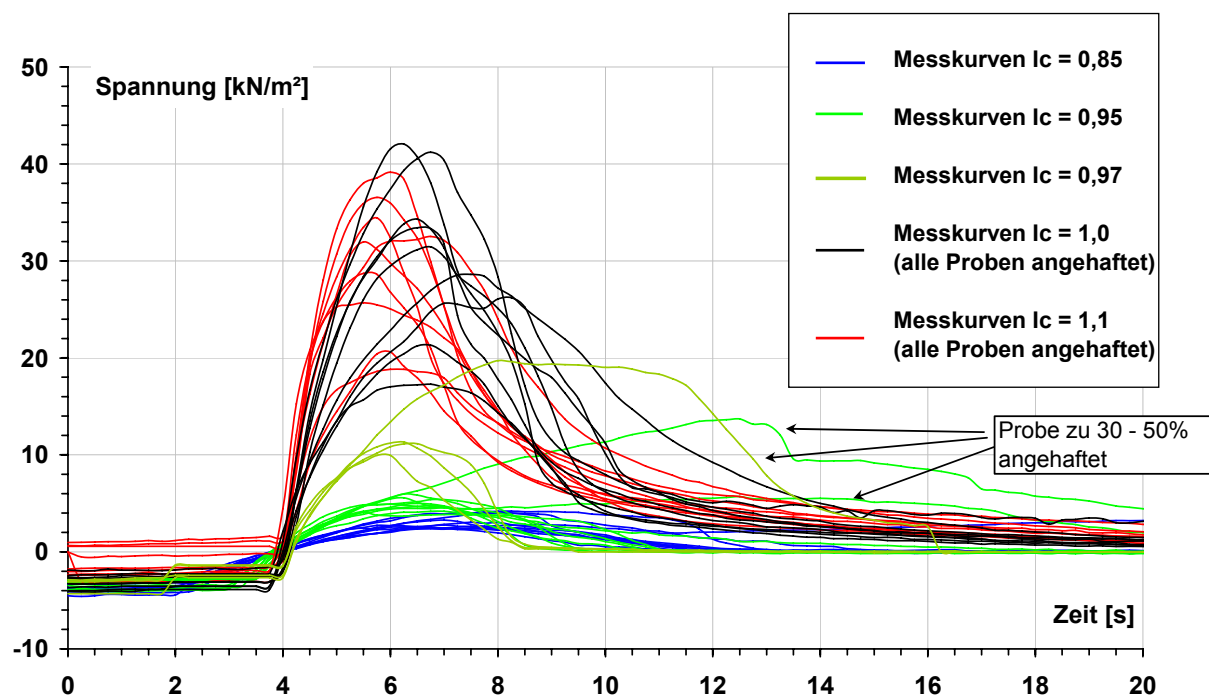


Abbildung 8.1: Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Konsistenz, Versuchston KI-W, (feinpolierter Adhäsionstestzylinder, Rauigkeit $R_z = 0,1 \mu\text{m}$, $\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$, $t_B = 1 \text{ min}$, $t_D = 1 \text{ min}$, $t_E = 40 \text{ s}$)

Alle Versuche mit Konsistenzzahlen $I_C = 1,0$ und $1,1$ führten zum bodeninternen Versagen der Proben. Es treten also so erhebliche Adhäsionsspannungen auf, dass die Zugfestigkeit der

Bodenproben überschritten wird. Die höchsten in diesen Versuchen gemessenen Werte betragen ca. 40 kN/m². Dieser Wert stimmt etwa mit der in Spaltzugversuchen gemessenen Zugfestigkeit des Bodens von $q_z = 36,8 \text{ kN/m}^2$ überein. Bei abnehmender Konsistenzzahl $I_C = 0,85 / 0,95 / 0,97$ konnten Adhäsionskräfte in der Regel direkt bestimmt werden. Lediglich bei einem Versuch bei $I_C = 0,97$ und zwei Versuchen bei $I_C = 0,95$ wurde ein Versagen der Probe beobachtet. Diese wurden aus der statistischen Auswertung (s.u.) herausgenommen. Bei einer Konsistenzzahl $I_C = 0,85$ wurde kein Versagen der Probe festgestellt. Insgesamt wurde eine Abnahme der Adhäsionsspannungen mit Abnahme der Konsistenzzahl festgestellt. Eine Zusammenfassung der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt Tabelle 8.1.

Tabelle 8.1 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl, Versuchston KI-W

			Konsistenzzahl				
			0,85	0,95	0,97	1,0	1,1
Anzahl Werte	n	[-]	6	8	3	10	10
Mittelwert	σ_A	[kN/m ²]	2,8	4,8	10,8	30,7	29,8
Standardabweichung	s	[kN/m ²]	0,29	0,62	0,76	8,31	6,98
Standardabweichung in % vom Mittelwert	s/σ_A	[%]	10,3	12,9	7,0	27,1	23,4

Die Versuche mit Konsistenzzahlen $I_C = 0,85, 0,95$ und $0,97$ zeigen mit ca. $\pm 7,0 \%$ ($I_C = 0,97$) bis $12,9 \%$ ($I_C = 0,95$) im Bezug zum jeweiligen Mittelwert eine geringe Schwankungsbreite der Versuchsergebnisse. Mit dem gewählten Versuchsverfahren kann somit die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gezeigt und damit die Gebrauchstauglichkeit des Verfahrens grundsätzlich angenommen werden.

Bei der Vorbereitung der Proben und beim Einbau in den Probenring hat sich gezeigt, dass die Proben bei einer Konsistenzzahl $I_C = 0,95$ am besten zu behandeln waren.

Weiterhin zeigen die Versuchsergebnisse eine große Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen des Wassergehaltes. Bei den Versuchen wurde daher der Wassergehalt äußerst sorgfältig konstant gehalten und überwacht. In dieser ersten Versuchsreihe wurde bereits deutlich, dass die Adhäsionsspannungen die Zugfestigkeit eines Bodens übersteigen können. Insbesondere dieser Fall kann im Falle des Anhaftens von Böden an Werkstoffoberflächen zu erheblichen Problemen führen.

8.3 Versuchsprogramm

Nach dem experimentellen Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Verfahrens wurde die Abhängigkeit der Adhäsionsspannung von:

- der Konsistenz bzw. der Konsistenzzahl I_C (und damit indirekt des Wassergehaltes) des Bodens (Kap. 8.4.1),
- der Andruckspannung σ_D (Kap. 8.4.2),
- der Andruck- und der Benetzungsdauer (Kap. 8.4.3),
- der Rauigkeit der Oberfläche des Adhäsionstestzylinders (Kap. 8.4.4),
- dem Material des Adhäsionstestzylinders (Kap. 8.4.4),
- der Benetzung der Tonoberfläche (Kap. 8.4.5),
- der Temperatur (Kap. 8.4.6)

untersucht. Alle jeweils nicht untersuchten Testparameter wurden konstant gehalten. In ausgewählten Versuchen wurde während des Versuches weiterhin der Porenwasserdruck im Versuchston gemessen (Kap. 9).

Zur Benetzung der Tonoberfläche wurde für einen Versuch jeweils 2,5 ml entionisiertes Wasser verwendet. Als Trenngeschwindigkeit wurde eine Geschwindigkeit von $v_T = 5 \text{ mm/min}$ gewählt. Die Dauer der Eigengewichtsphase betrug $t_E = 40 \text{ s}$.

Wenn nicht anders beschrieben, wurden als Standard für die Benetzungsdauer t_B und die Andruckdauer t_D jeweils 1 min gewählt. Weiterhin wurde im Regelfall der Adhäsionstestzylinder mit feinpolierter Oberfläche eingesetzt. Die Versuche wurden im Regelfall bei Raumtemperatur (20° C) durchgeführt.

8.4 Ergebnisse

8.4.1 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Konsistenz

In Abbildung 8.2 sind die Ergebnisse von Adhäsionsversuchen mit Änderung der Konsistenz der Versuchstone bei einer Andruckspannungen $\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$ dargestellt. Es wurden die in der Tabelle 8.2 zusammengefassten Konsistenzen untersucht.

Tabelle 8.2 Untersuchte Konsistenzen

Versuchston	Untersuchte Konsistenzen I_c									
	0,85	0,88	0,92	0,95	0,97	1,00	1,03 / 1,04	1,10	1,13	1,41
KI-S	x			x		x				x
KI-W	x			x	x	x		x		
ISK-E		x	x		x		x		x	
SI-B	x			x		x				

Die Konsistenzen für den Versuchston ISK-E wurden entsprechend der Schwankungsbreiten der in den bodenmechanischen Versuchen festgestellten Konsistenzen zwischen $I_c = 0,88$ und $I_c = 1,13$ untersucht. Der Versuchston KI-S wurde außer für die Konsistenzen $I_c = 0,85 / 0,95 / 1,0$ auch für die Konsistenz $I_c = 1,41$ untersucht, da diese dem natürlichen Wassergehalt entspricht.

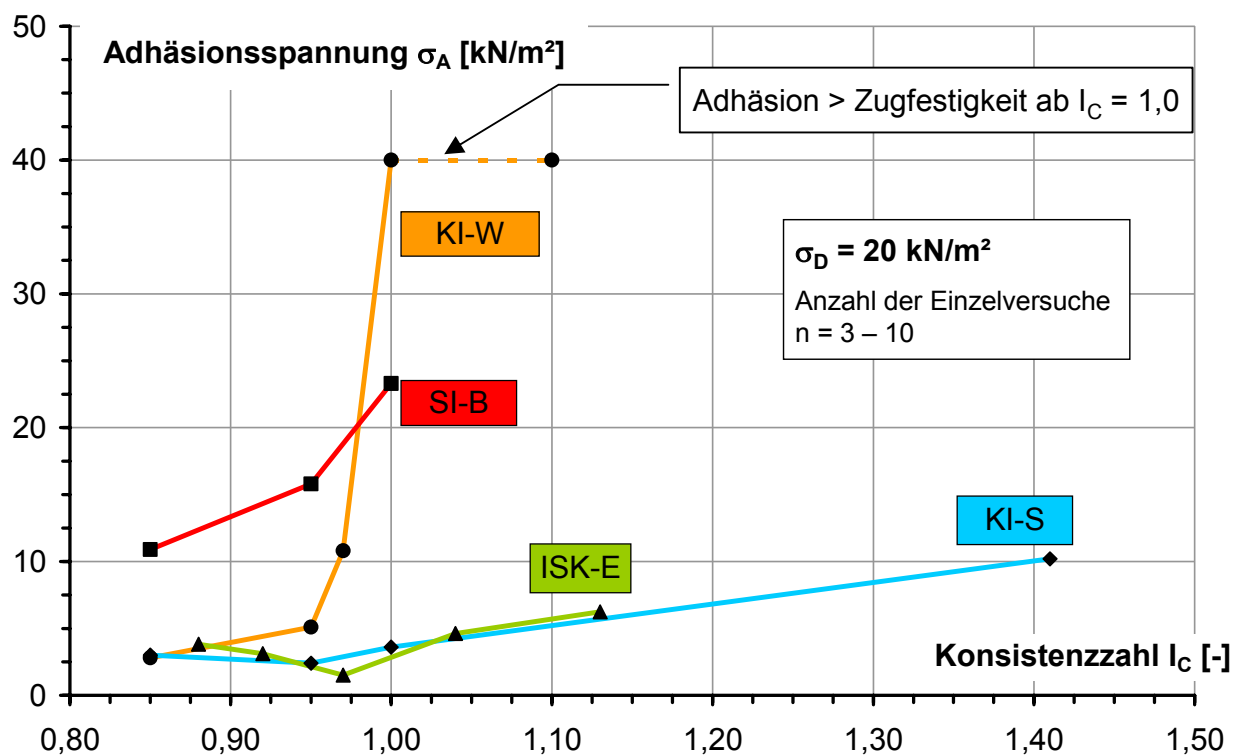


Abbildung 8.2: Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Konsistenz

Die Versuchstone KI-W und SI-B zeigen ab einer Konsistenz von $I_C = 0,95$ einen deutlichen Anstieg der Adhäsionsspannungen. Der Anstieg der Adhäsionsspannungen der Versuchstone KI-S und ISK-E ab etwa dieser Konsistenzgrenze ist ebenfalls zu erkennen, allerdings weniger ausgeprägt. Die Versuchstone KI-S und ISK-E sind somit deutlich geringer sensibel gegenüber Änderungen der Konsistenz im Vergleich zu den Versuchstonen KI-W und SI-B. Auf die Auffälligkeit des Versuchstons KI-W bei Konsistenzzahlen $I_C > 1,0$ im Hinblick auf die Anhaftungen wurde bereits hingewiesen (siehe Kap. 8.2).

Tabelle 8.3 Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Konsistenzabhängigkeit der Adhäsionsspannungen ($\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$)

Versuchston	Konsistenz I_C [-]	Anzahl der Versuche n [-]	Mittelwert der Adhäsionsspannung σ_A [kN/m ²]	Standard- abweichung s [kN/m ²]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/σ_A [%]
KI-S	0,85	3	3,0	0,33	11,1
	0,95	4	2,4	0,17	6,9
	1,00	5	3,6	0,33	9,1
	1,41	3	10,2	0,83	8,2
KI-W	0,85	6	2,8	0,29	10,3
	0,95	10	5,1	0,81	15,8
	0,97	3	10,8	0,76	7,0
	1,00	10	30,7	8,31	27,1
	1,10	10	29,8	6,98	23,4
ISK-E	0,88	3	3,83	0,72	18,8
	0,92	10	3,11	0,54	17,5
	0,97	4	1,51	0,35	22,9
	1,04	7	4,63	1,06	23,0
	1,13	8	6,25	1,30	20,8
SI-B	0,85	5	10,9	2,14	19,6
	0,95	8	15,8	4,06	25,6
	1,00	5	23,3	6,35	27,2

Die Schwankungsbreiten der Versuchsergebnisse im Bezug zum jeweiligen Mittelwert sind in Tabelle 8.3 angegeben. Die beiden ausgeprägt plastischen Versuchstone ISK-E und SI-B zeigen dabei größere Schwankungsbreiten als die leicht- und mittelplastischen Versuchstone KI-W und KI-S. Die Schwankungsbreiten werden umso größer, je höher die Konsistenzzahl, also je steifer der Ton wird. Die Versuchstone ISK-E und SI-B waren aufgrund ihrer höheren Plastizität auch schwerer zu bearbeiten. Es wird daher vermutet, dass der Grund für diese größeren Schwankungsbreiten in der Möglichkeit der handwerklichen Qualität des Einbaus der Proben und insbesondere der Bearbeitung der Oberfläche zu suchen ist. Die Bearbeitung wird

umso schwieriger je steifer ein Boden ist. Ab einer Konsistenzzahl $I_C > 1,0$ ist ein ausgeprägt plastischer Ton im Allgemeinen sehr schwer zu bearbeiten. Der Ton muss mit entsprechend besonderer Sorgfalt in das Versuchsgerät eingebaut werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Adhäsionsspannungen wesentlich von der Konsistenz abhängen. Diese grundsätzliche Abhängigkeit wurde auch bereits in anderen Untersuchungen festgestellt [Thewes, 1999], [Wilms; 1995], [Beretitsch, 1992], [Jancsecz, 1991], [Schlick, 1989], [Riek, 1963], [Schachbasian, 1890].

Die Adhäsionsspannungen in diesen Versuchen mit gezielter Benetzung der Tonoberfläche sind umso höher, je größer die Konsistenzzahl I_C bzw. je geringer der Wassergehalt ist. Diesen Zusammenhang hat auch Thewes [1999] nachgewiesen (siehe Kap. 5.1.17).

8.4.2 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Andruckspannung

Die Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Andruckspannung σ_D wurde für Andruckspannungen von $\sigma_D = 4,3 \text{ kN/m}^2$ (entspricht dem Eigengewicht der Adhäsionstestzylinder) bis $\sigma_D = 500 \text{ kN/m}^2$ in 28 Versuchsreihen mit insgesamt 86 Einzelversuchen untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.3 dargestellt. Dabei wurden für Andruckspannungen bis 50 kN/m^2 eine Anzahl von $n = 3 - 9$ Einzelversuche, ab Andruckspannungen über 50 kN/m^2 von $n = 1 - 3$ Einzelversuche durchgeführt.

Die Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Andruckspannung für den Versuchston ISK-E wurde – abweichend von der Standardkonsistenz für diese Versuche von $I_C = 0,95$ – für die obere Grenze der Konsistenz von $I_C = 1,13$ untersucht. Damit sollte die Grundlage für eine Abschätzung der Verklebungsrisiken bei dem geplanten Tunnelvortrieb geschaffen werden.

Der Versuchston ISK-E zeigt keine deutliche Abhängigkeit von der Andruckspannung. Bei den Versuchstonen KI-W und SI-B ist bei einer Andruckspannung von $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$ ein lokales Maximum und bei einer etwas höheren Andruckspannung von $\sigma_D = 80 \text{ kN/m}^2$ ein lokales Minimum zu erkennen. Die Adhäsionsspannung beim Versuchston SI-B zeigt bei weiterer Steigerung der Andruckspannung keine deutliche Abhängigkeit. Bei dem Versuchston KI-W steigen die Adhäsionsspannungen ab Andruckspannungen $\sigma_D > 200 \text{ kN/m}^2$ sehr stark bis auf Werte von fast 100 kN/m^2 an. Der Versuchston KI-S zeigt ein ähnliches Verhalten. Bis Andruckspannungen von 250 kN/m^2 ist keine deutliche Abhängigkeit von der Andruckspannung zu erkennen. Ab dieser Andruckspannung steigt die Adhäsionsspannung sehr stark an und erreicht mit über ca. 125 kN/m^2 die höchste in allen Versuchsreihen gemessene Adhäsionsspannung.

Bei Andruckspannungen ab etwa 150 kN/m² wurden bei allen Versuchen vergleichsweise große Verformungen des Versuchstons bis zum grundbruchartigen Versagen festgestellt. Beim Abziehen der Adhäsionstestzylinder war bei diesen Andruckspannungen. Die Oberfläche des Testzylinders war nach dem Abziehen bei diesen Versuchen vollständig verklebt.

Grundsätzlich wird ein Ansteigen der Adhäsionsspannung mit der Andruckspannung festgestellt. Diesen grundsätzlichen Zusammenhang des Anstiegs der Adhäsionsspannung mit Steigerung der Andruckspannung wurde u.a. auch von Potyondy [1961], Riek [1963], Schlick [1989], Beretitsch [1992] und Thewes [1999] gefunden. Die Änderung der Adhäsionsspannung wird dabei wesentlich von der Bodenart bestimmt. Die leicht- und mittelpastischen Versuchstone zeigen ab einem bestimmten Grenzwert ein deutliches Ansteigen der Adhäsionsspannungen, während die Änderung der Adhäsionsspannungen bei den ausgeprägt plastischen Tone deutlich geringer ausgeprägt ist.

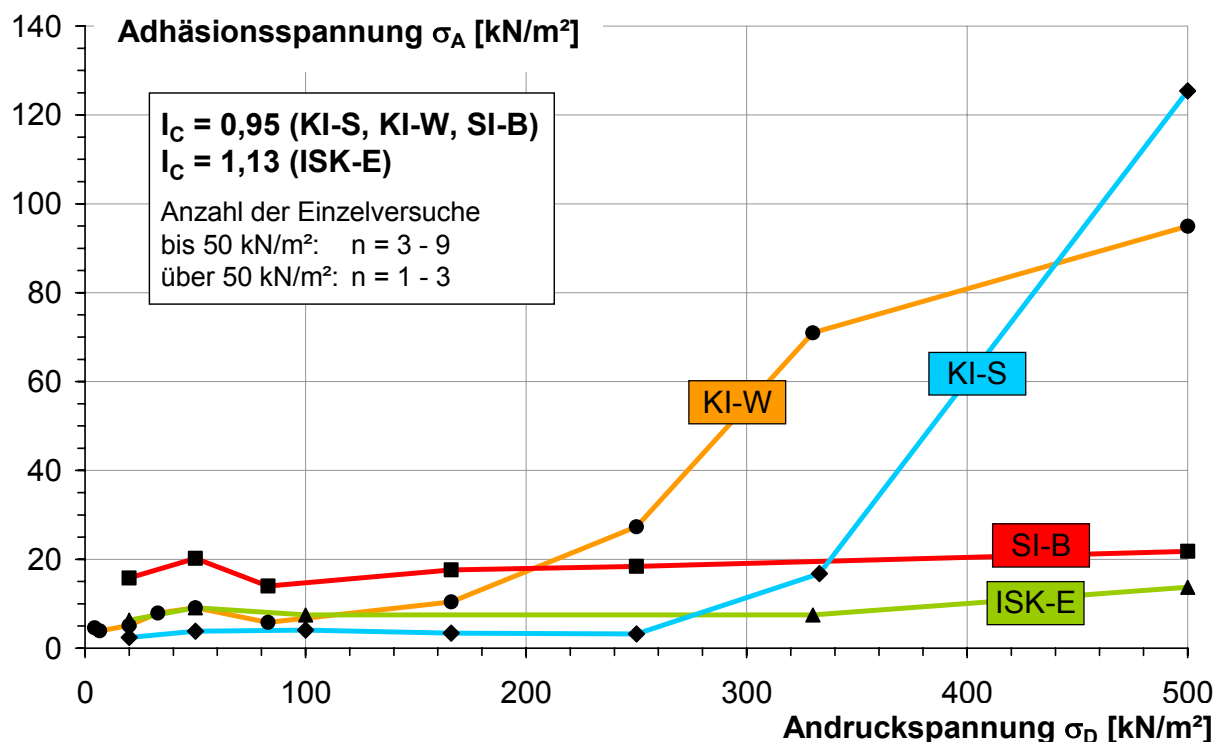


Abbildung 8.3: Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Andruckspannung

Die Schwankungsbreiten der Versuchsergebnisse im Bezug zum jeweiligen Mittelwert sind in

Tabelle 8.4 angegeben. Die beiden ausgeprägt plastischen Versuchstone ISK-E und SI-B zeigen auch größere und ungleichmäßigere Schwankungsbreiten als die leicht- und mittelpastischen Versuchstone KI-W und KI-S.

Tabelle 8.4 Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Andruckspannung

Versuchston	Andruckspannung σ_D [kN/m ²]	Anzahl n [-]	Adhäsions- spannung σ_A [kN/m ²]	Standard- abweichung s [kN/m ²]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/ σ_A [%]
KI-S	20	4	2,4	0,17	6,9
	50	4	3,8	0,79	20,7
	100	1	4,1	-	-
	166	1	3,4	-	-
	250	1	3,2	-	-
	333	1	16,8	-	-
	500	2	125,4	3,91	3,1
KI-W	4,3	3	4,6	0,67	14,6
	6,6	4	3,9	0,56	14,4
	20	10	5,1	0,81	15,8
	33	5	7,9	1,30	16,4
	50	5	9,5	1,41	15,4
	83	1	5,8	-	-
	166	1	10,4	-	-
	250	1	27,3	-	-
	330	1	71,0	-	-
	500	1	94,9	-	-
ISK-E	20	9	6,3	1,30	20,8
	50	3	9,1	2,29	25,1
	100	3	7,5	1,62	21,7
	330	1	7,5	-	-
	500	1	13,7	-	-
SI-B	20	8	15,8	4,06	25,6
	50	3	20,2	6,80	33,6
	83	3	14,0	2,21	15,8
	166	3	17,6	2,57	14,6
	250	3	18,4	4,22	23,0
	500	3	21,8	1,92	8,9

8.4.3 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Andruckdauer und der Benetzungsdauer

Der Einfluss der Andruckdauer t_D auf die Adhäsionsspannung wurde an den Versuchstonen SI-B bei einer Konsistenz $I_C = 0,95$ und einer Andruckspannung $\sigma_D = 20$ kN/m² bis 10 min Andruckdauer und am Versuchston ISK-E bei einer Konsistenz $I_C = 1,13$ und einer Andruckspannung $\sigma_D = 50$ kN/m² bis 40 min Andruckdauer bestimmt. Es wurden 9 Versuchsreihen mit insgesamt 21 Einzelversuchen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.4 dargestellt.

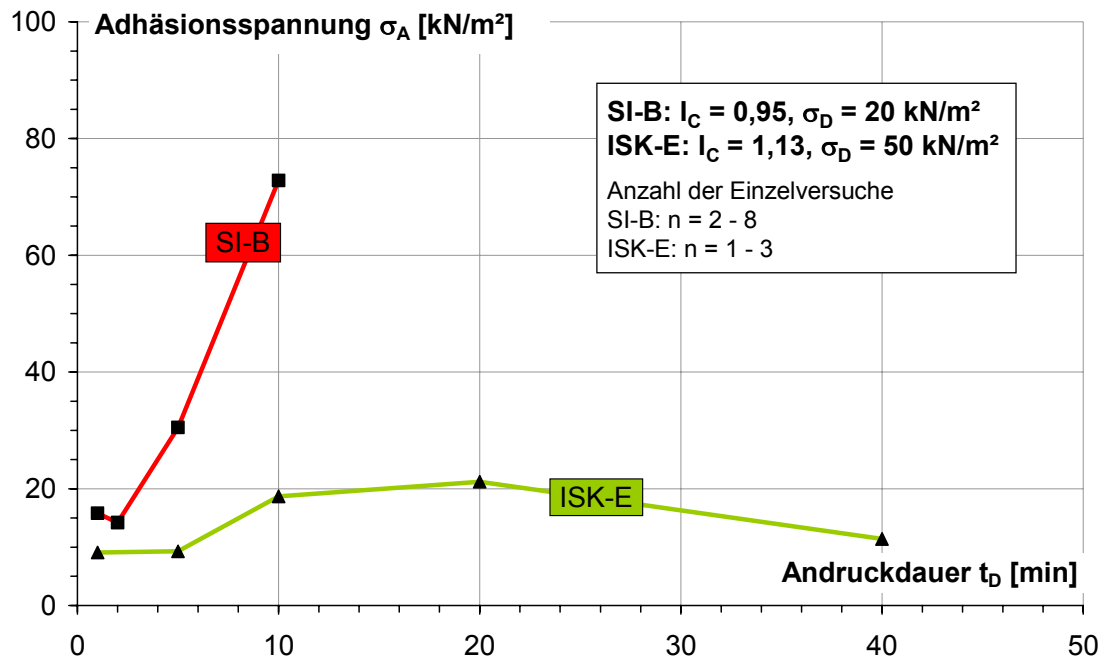


Abbildung 8.4: Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Andruckdauer

Die Adhäsionsspannung steigt mit zunehmender Andruckdauer. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls von Schlick [1989] und Thewes [1999] gefunden.

Der Versuchston ISK-E zeigt allerdings bei einer sehr langen Andruckdauer ($t_D > 20$ min) wiederum eine Abnahme der Adhäsionsspannung. Bei dem Ton stellt sich ein Maximum der Adhäsionsspannung bei einer Andruckdauer von ca. 20 min ein.

Tabelle 8.5 Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Andruckdauer

Versuchston	Andruckdauer t_D [min]	Anzahl n [-]	Adhäsions- spannung σ_A [kN/m²]	Standard- abweichung s [kN/m²]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/σ_A [%]
ISK-E	1	3	9,1	2,29	25,1
	5	1	9,3	-	-
	10	1	18,7	-	-
	20	1	21,2	-	-
	40	1	11,4	-	-
SI-B	1	8	15,8	4,06	25,6
	2	2	14,2	0,28	2,0
	5	2	30,5	4,5	14,8
	10	2	72,8	1,56	2,1

Die Schwankungsbreiten der Versuchsergebnisse im Bezug zum jeweiligen Mittelwert sind in Tabelle 8.5 angegeben. Die Schwankungsbreiten liegen in der Größenordnung der bisher vorgestellten Versuchsergebnisse dieser Tone.

Der Einfluss der Benetzungsdauer t_B auf die Adhäsionsspannung wurde an dem Versuchston SI-B in zwei Versuchsreihen mit 10 Einzelversuchen bei einer Konsistenz $I_C = 0,95$ und einer Andruckspannung $\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$ bestimmt (Abbildung 8.5). Die Adhäsionsspannung sinkt mit zunehmender Benetzungsdauer. Damit wird der von Thewes [1999] dazu gefundene Zusammenhang ebenfalls bestätigt.

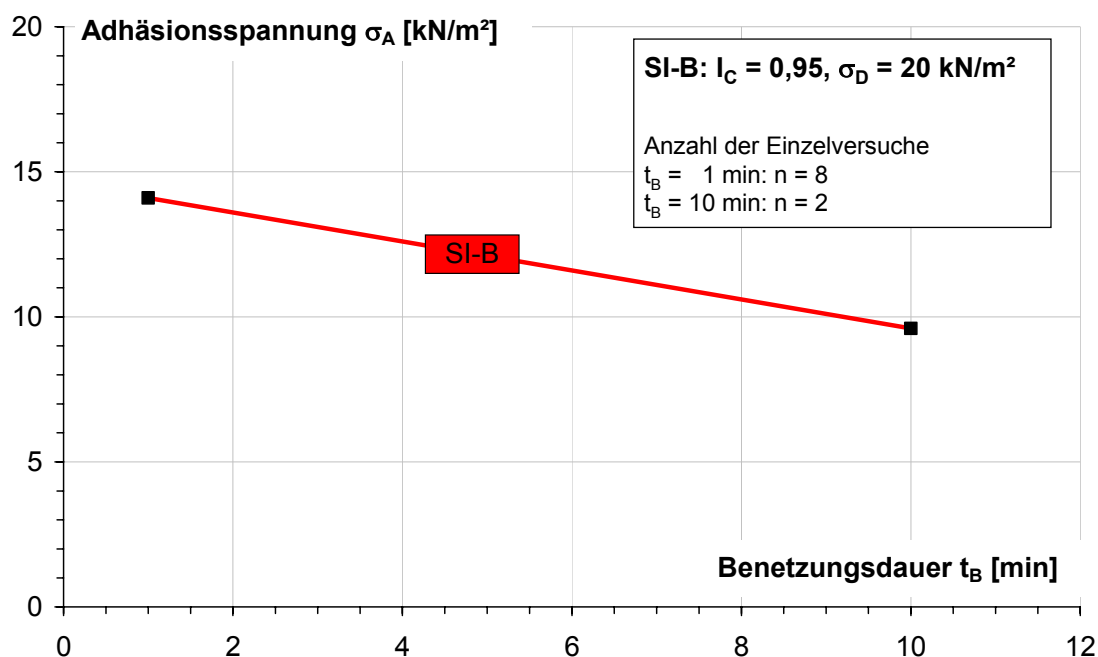


Abbildung 8.5: Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Benetzungsdauer

Die Schwankungsbreiten der Versuchsergebnisse im Bezug zum jeweiligen Mittelwert sind in Tabelle 8.6 angegeben. Die Schwankungsbreiten liegen in der Größenordnung der bisher vorgestellten Versuchsergebnisse dieser Tone.

Tabelle 8.6 Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Benetzungsdauer

Versuchston	Benetzungsdauer t_D [min]	Anzahl n [-]	Adhäsions- spannung σ_A [kN/m²]	Standard- abweichung s [kN/m²]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/σ_A [%]
SI-B	1	8	15,8	4,06	25,6
	10	2	9,6	0,53	5,5

8.4.4 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Rauigkeit der Werkstoffoberfläche und des Materials

Der Einfluss der Rauigkeit einer Werkstoffoberfläche und der Einfluss des Werkstoffmaterials auf die Größe der Adhäsionsspannungen wurde an den Versuchstonen KI-S, KI-W und SI-B in 32 Versuchsreihen mit insgesamt 165 Einzelversuchen untersucht. Dabei wurde auch der Einfluss der Andruckspannung σ_D erfasst. In allen Versuchen wurde eine Konsistenz von $I_C = 0,95$ eingestellt.

Die Versuchsreihen wurden zunächst an dem Versuchston KI-W an allen fünf Adhäsionstestzylindern durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde der Umfang der folgenden Versuchsreihen an den Versuchstonen KI-S und SI-B auf drei Adhäsionstestzylinder reduziert. Dazu wurde der Adhäsionstestzylinder mit feinpolierter und mit gedrehter Oberfläche sowie der Adhäsionstestzylinder aus Teflon verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.6 zusammengefasst.

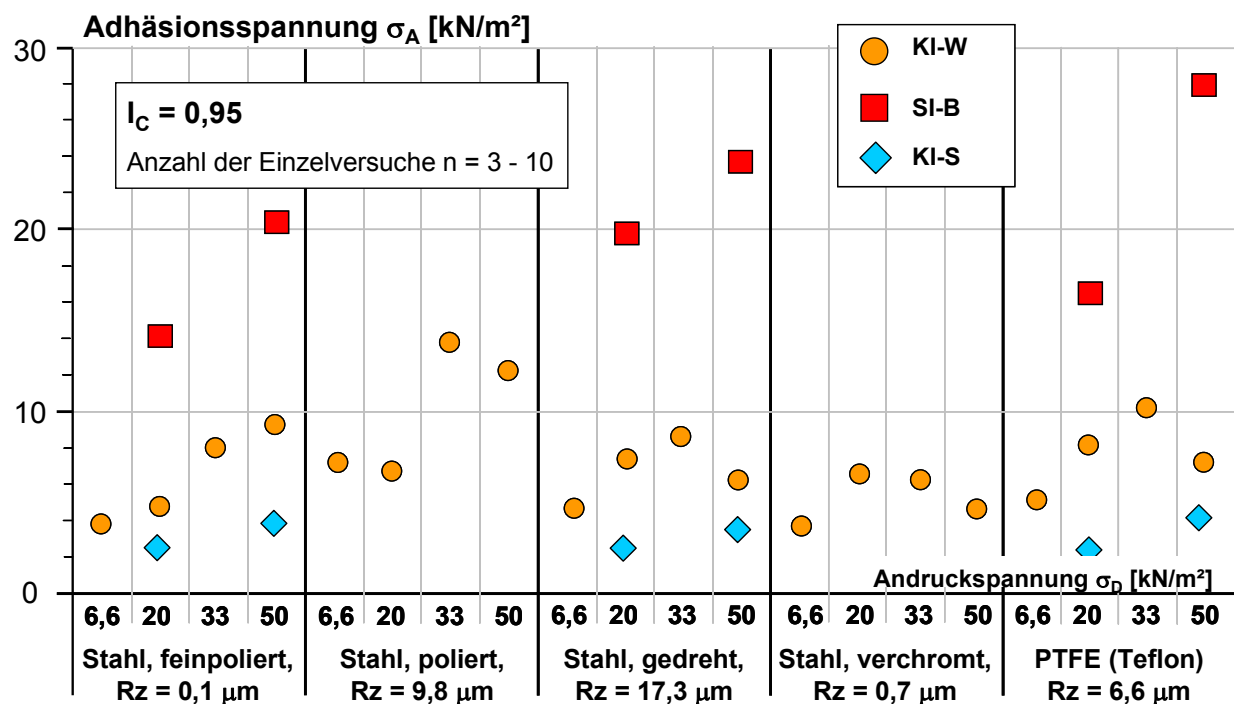


Abbildung 8.6: Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit, dem Material und der Andruckspannung

Der Versuchston SI-B zeigt die höchsten Adhäsionsspannungen zwischen ca. 14 und 27 kN/m², der Versuchston KI-W zeigt Adhäsionsspannungen zwischen ca. 4 und 14 kN/m². Der Versuchston KI-S liefert die geringsten Adhäsionsspannungen zwischen ca. 2 und 4 kN/m².

Statistische Angaben zu den Versuchsergebnissen sind in Tabelle 8.7 angegeben. Die Schwankungsbreiten der Versuchsergebnisse im Bezug zum jeweiligen Mittelwert betragen im Allgemeinen zwischen ca. 10 % und ca. 20 % gegenüber dem jeweiligen Mittelwert, bei neun Versuchsreihen über 20 %, davon in zwei Fällen ca. 34 % des jeweiligen Mittelwertes.

Tabelle 8.7 Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Oberflächenrauigkeit und des Materials

	Andruckspannung σ_D [kN/m ²]	KI-S				KI-W				SI-B			
		Adhäsionsspannung σ_A [kN/m ²]	Anzahl der Versuche n [-]	Standardabweichung s [kN/m ²]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/ σ_A [%]	Adhäsionsspannung σ_A [kN/m ²]	Anzahl der Versuche n [-]	Standardabweichung s [kN/m ²]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/ σ_A [%]	Adhäsionsspannung σ_A [kN/m ²]	Anzahl der Versuche n [-]	Standardabweichung s [kN/m ²]	Standardabweichung in % des Mittelwertes s/ σ_A [%]
Stahl, feinpoliert, Rz = 0,1 µm	6,6	-	-	-	-	3,9	4	0,56	14,7	-	-	-	-
	20,0	2,4	4	0,17	6,9	5,1	10	0,81	15,8	15,8	8	4,06	25,6
	33,0	-	-	-	-	7,9	5	1,30	16,4	-	-	-	-
	50,0	3,8	4	0,79	20,7	9,1	5	1,41	15,4	20,2	3	6,80	33,6
Stahl, poliert, Rz = 9,8 µm	6,6	-	-	-	-	7,1	7	1,69	23,9	-	-	-	-
	20,0	-	-	-	-	6,4	8	1,51	23,4	-	-	-	-
	33,0	-	-	-	-	13,5	6	3,58	26,4	-	-	-	-
	50,0	-	-	-	-	12,0	7	2,59	21,5	-	-	-	-
Stahl, gedreht, Rz = 17,3 µm	6,6	-	-	-	-	4,7	5	0,78	16,5	-	-	-	-
	20,0	2,3	4	0,27	11,7	7,3	5	0,66	9,1	19,3	7	3,68	19,1
	33,0	-	-	-	-	8,5	5	0,39	4,6	-	-	-	-
	50,0	4	3	0,57	14,4	6,2	5	0,53	8,7	20,1	5	4,75	23,6
Stahl, verchromt, Rz = 0,6 µm	6,6	-	-	-	-	3,7	4	0,62	16,8	-	-	-	-
	20,0	-	-	-	-	6,5	4	0,92	14,2	-	-	-	-
	33,0	-	-	-	-	6,2	5	1,14	18,3	-	-	-	-
	50,0	-	-	-	-	4,7	3	0,90	19,4	-	-	-	-
PTFE (Teflon), Rz = 6,6 µm	6,6	-	-	-	-	5,3	5	0,51	9,4	-	-	-	-
	20,0	2,1	5	0,30	14,0	8,0	5	0,77	9,6	16,1	3	5,47	33,9
	33,0	-	-	-	-	10,1	5	0,62	6,2	-	-	-	-
	50,0	4	4	0,66	16,7	7,2	5	0,39	5,4	27,1	7	5,46	20,2

Die Adhäsionsspannungen sind für die unterschiedlichen Rauigkeiten der Adhäsionstestzylinder aus Stahl zwar für die drei Versuchstone jeweils unterschiedlich groß, liegen aber in jeweils vergleichbarer Größenordnung. Der Einfluss der Rauigkeit auf die Adhäsionsspannungen kann daher als untergeordnet eingeschätzt werden.

Die Adhäsionsspannungen bei Verwendung des chrombeschichteten Adhäsionstestzylinders und des Adhäsionstestzylinders aus Teflon liegen in der Größenordnung der Adhäsionsspannungen der stählernen Adhäsionstestzylinder. Der Einfluss des Materials auf die

Adhäsionsspannungen wird daher ebenfalls als untergeordnet eingeschätzt. Dies deckt sich qualitativ auch mit den Ergebnissen von Schachbasian [1890] und Fontaine [1954]. In der Anwendung beim Tunnelbau wurde beim Bau der U-Bahnlinie 8 in Berlin mit geringem Erfolg versucht, Anhaftungen am Schneidrad durch Beschichtung mit Teflonplatten zu verringern [Geppert, 1999].

Die Ergebnisse von Riek [1963] bzgl. der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Rauigkeit und des Materials (Kap. 5.1.7) können qualitativ nicht bestätigt werden. Allerdings wird die Oberfläche der Tone bei den Versuchen von Riek nicht gezielt benetzt. Der Unterschied der Ergebnisse ist mutmaßlich hierauf zurückzuführen.

Für die Erforschung des Adhäsionsverhaltens und für die Planung von Tunnelvortrieben bedeutet dies, dass die Arbeiten in erster Linie auf bodenmechanische Fragestellungen konzentriert werden können.

8.4.5 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Benetzung

Zur Untersuchung des Einflusses des Flüssigkeitsfilms in der Grenzfläche wurden Versuche ohne gezielte Benetzung der Tonoberfläche in 9 Versuchsreihen mit insgesamt 39 Einzelversuchen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.7 dargestellt. Die Andruckspannungen betrugen $\sigma_D = 20$ und 50 kN/m^2 , bei Versuchston ISK-E zusätzlich $\sigma_D = 83 \text{ kN/m}^2$. Die Konsistenz betrug $I_C = 0,95$, bei Versuchston ISK-E: $I_C = 1,03$.

Der leichtplastische Versuchston KI-S und der mittelplastische Versuchston KI-W zeigen dabei ein gänzlich anderes Verhalten als die ausgeprägt plastischen Tone ISK-E und SI-B. Bei den Versuchstonen KI-S und KI-W sind die Adhäsionsspannungen bei den Versuchen ohne Benetzung deutlich größer als bei den Versuchen mit Benetzung. Bei den Versuchen ohne Benetzung an den Tonen ISK-E und SI-B sind die Adhäsionsspannungen dagegen deutlich kleiner als bei den jeweiligen Versuchen mit Benetzung.

Der Unterschied der Ergebnisse mit und ohne Benetzung ist bei den Versuchstonen KI-S und SI-B deutlicher als bei den beiden anderen Versuchstonen.

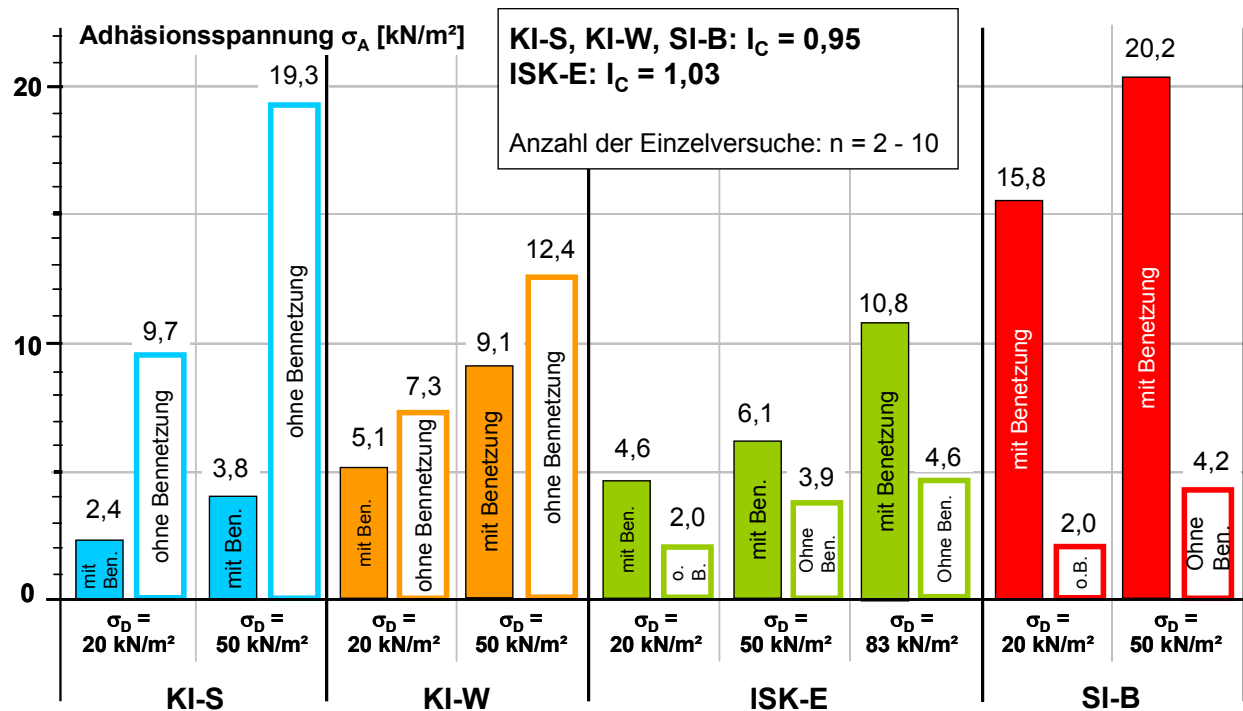


Abbildung 8.7: Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Benetzung und der Andruckspannung ($I_C = 0,95$)

Statistische Angaben zu den Versuchsergebnissen sind in Tabelle 8.8 angegeben.

Insbesondere bei dem Versuchston SI-B schwanken die Versuchsergebnisse bei den Versuchen ohne Bewässerung erheblich. Der Grund hierfür dürfte einerseits in der bereits erwähnten schwierigeren Verarbeitbarkeit dieses Tons begründet sein. Zum zweiten muss das für den Aufbau von Adhäsionskräften erforderliche Kapillarwasser aus dem Ton heraus in die Grenzfläche hineintransportiert werden. Dies ist bei der hohen Plastizität dieses Tons wesentlich schwieriger als bei den anderen Versuchstönen. Dieser Prozess ist wesentlich von den Eigenschaften der obersten Millimeter des Tons abhängig. Hier wirken sich dann geringste Unregelmäßigkeiten bei der Bearbeitung der Oberfläche enorm auf die Größe der Adhäsionsspannungen aus.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Adhäsionsverhalten wesentlich durch den Flüssigkeitsfilm in der Grenzfläche beeinflusst wird. Bei Tunnelvortrieben kann die Zugabe von Wasser, entweder gezielt infolge der Verfahrenstechnik oder durch unkontrollierten Zutritt von Grundwasser, offensichtlich erhebliche Änderungen des Verklebungsverhaltens bewirken.

Tabelle 8.8 Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Benetzung

Versuchston	Andruckspannung σ_D [kN/m ²]	Mit Benetzung	Ohne Benetzung	Anzahl der Versuche n [-]	Adhäsions- spannung σ_A [kN/m ²]	Standard- abweichung s [kN/m ²]	Standard- abweichung in % des Mittelwertes s/ σ_A [%]
KI-S	20	x		4	2,4	0,17	6,9
	50	x		4	3,8	0,79	20,7
	20		x	5	9,7	1,38	14,1
	50		x	6	19,3	4,22	21,9
KI-W	20	x		10	5,1	0,81	15,8
	50	x		5	9,1	1,41	15,4
	20		x	4	7,3	1,98	27,0
	50		x	4	12,4	1,80	14,6
ISK-E	20	x		7	4,6	1,06	23,0
	50	x		4	6,1	1,36	22,2
	83	x		3	10,3	2,46	23,8
	20		x	6	2,0	0,55	27,1
	50		x	6	3,9	0,78	19,9
	83		x	2	4,6	0,31	6,9
SI-B	20	x		8	15,8	4,06	25,6
	50	x		3	20,2	6,80	33,6
	20		x	3	2,0	2,37	56,5
	50		x	3	4,2	1,42	71,6

8.4.6 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Temperatur

An den Versuchstonen KI-S, KI-W und SI-B wurde der Einfluss der Temperatur auf die Größe der Adhäsionsspannungen in drei Versuchsreihen mit insgesamt 14 Einzelversuchen untersucht. Dazu wurden der im Adhäsionsmessgerät eingebaute Ton, die Benetzungsflüssigkeit und der Adhäsionstestzylinder auf eine Temperatur von 5° C eingestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.8 zusammengefasst und mit den Ergebnissen der Versuche für eine Temperatur von 20° C verglichen.

Die Adhäsionsspannungen nehmen mit sinkender Temperatur zu. Bei dem leichtplastischen Versuchston KI-S beträgt der Unterschied der mittleren Adhäsionsspannungen 21 %, bei dem ausgeprägt plastischen Versuchston SI-B 48 %.

Der Unterschied zwischen den Temperaturen ist auch qualitativ an den Messwerten deutlich. In Abbildung 8.9 sind exemplarisch für den Versuchston KI-W die Messwerte für Versuche bei 5° C und 20° C dargestellt. Die Messwerte für die Versuche bei 5° C zeigen eine größere Steigung als die Messkurven der Versuche bei 20° C.

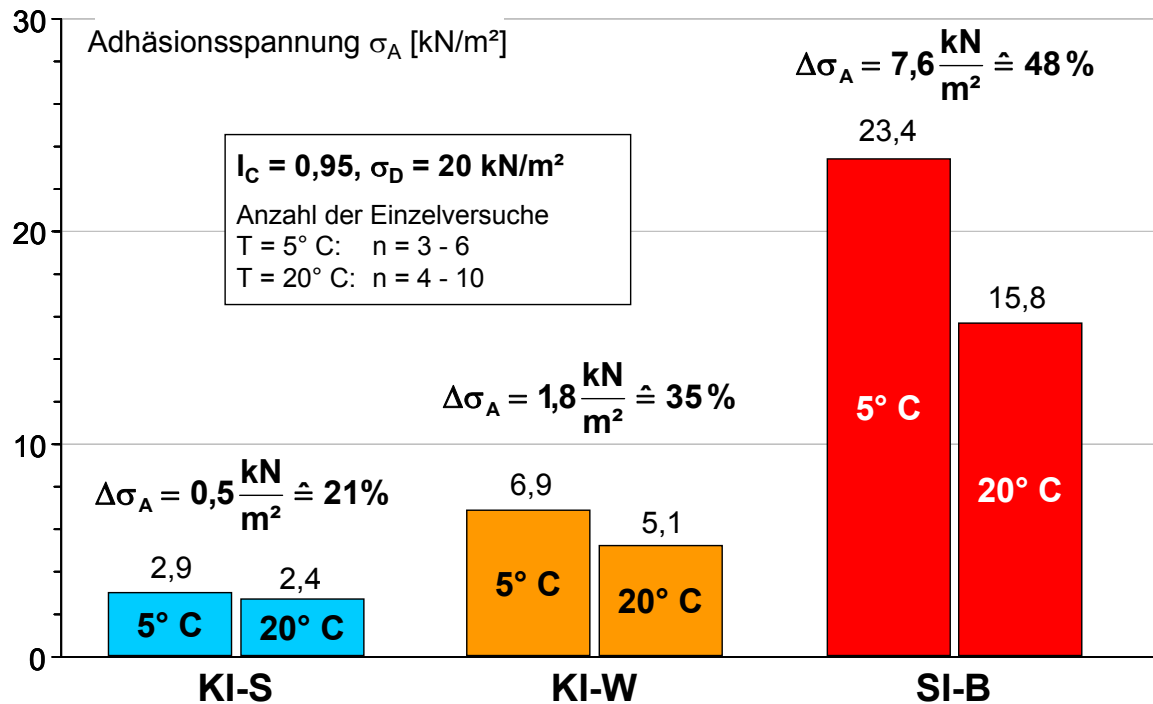
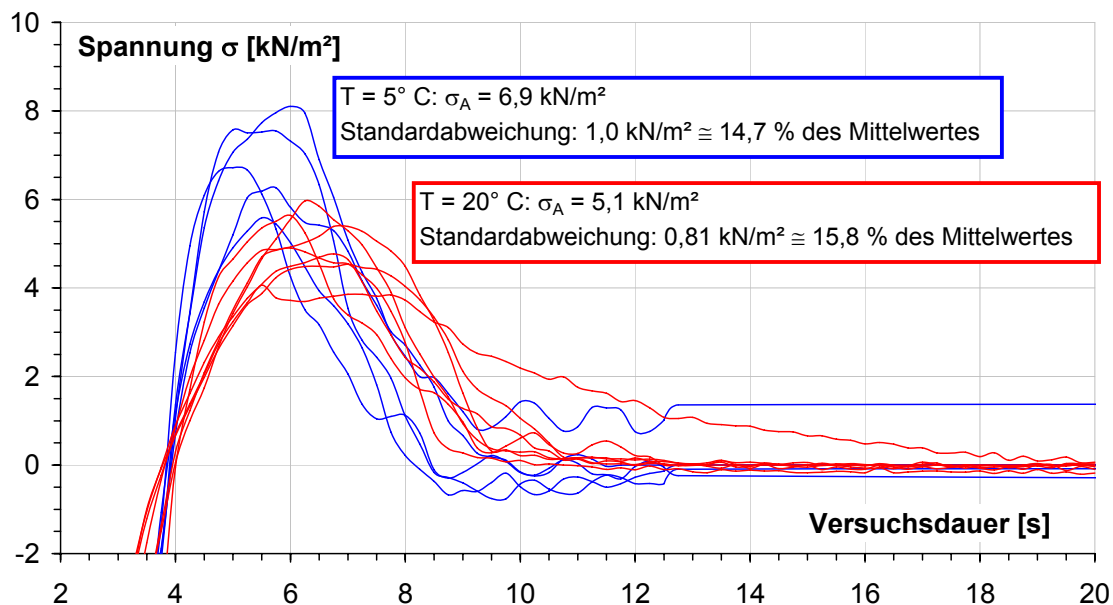


Abbildung 8.8: Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur

Abbildung 8.9: Versuchsergebnisse für Adhäsionsversuche bei 5° C und 20° C, Versuchston KI-W, $I_C = 0,95$, Andruckspannung $\sigma_D = 20$ kN/m² (nur Trennphase dargestellt)

Statistische Angaben zu den Versuchsergebnissen sind in Tabelle 8.9 angegeben. Die Schwankungsbreiten liegen auch bei diesen Versuchen im Regelfall zwischen ca. 10 % und 20 % im Bezug zum jeweiligen Mittelwert.

Tabelle 8.9 Statistische Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Temperatur

Versuchston	Temperatur T [° C]	Anzahl der Versuche n [-]	Adhäsions- spannung σ_A [kN/m ²]	Standard- abweichung s [kN/m ²]	Standard- abweichung in % des Mittelwertes s/ σ_A [%]
KI-S	5	5	2,9	0,86	29,4
	20	4	2,4	0,17	6,9
KI-W	5	5	6,9	1,01	14,7
	20	10	5,1	0,81	15,8
SI-B	5	3	23,4	3,30	14,1
	20	8	15,8	4,06	25,6

Die Adhäsionsspannung hängt – bei konstanter Querschnittsfläche der Adhäsionstestzylinder – gemäß Gleichung 3.12 außer von der Dicke des Flüssigkeitsfilmes in der Grenzfläche nur noch von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit ab. Da die Oberflächenspannung von Wasser bei niedrigeren Temperaturen ansteigt, sind daher bei 5° C auch größere Adhäsionsspannungen als bei 20° C zu erwarten. Der Unterschied zwischen den Oberflächenspannungen für diese Temperaturen beträgt allerdings nur etwa 3 % (Abbildung 8.10) und ist damit um etwa eine Größenordnung kleiner als der Unterschied der Adhäsionsspannungen. Der Unterschied der dynamischen Viskosität beträgt hingegen ca. 54 % und liegt damit in der Größenordnung des Unterschiedes der Adhäsionsspannungen. Vor diesem Hintergrund lassen die Ergebnisse der Adhäsionsversuche den Schluss zu, dass die Bewegung von Wasser während des Versuches eine enorme Rolle für die Größe der Adhäsionsspannungen spielt.

Oberflächenspannung:

$$\left. \begin{array}{l} \text{bei } T=5^{\circ}\text{C} : \gamma = 7,49 \cdot 10^{-5} \text{ kNm/m}^2 \\ \text{bei } T=20^{\circ}\text{C} : \gamma = 7,28 \cdot 10^{-5} \text{ kNm/m}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta\gamma = 2,9 \%$$

dynamische Viskosität η :

$$\left. \begin{array}{l} \text{bei } T=5^{\circ}\text{C} : \eta = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ \text{bei } T=20^{\circ}\text{C} : \eta = 1,01 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta\eta = 53,5 \%$$

Abbildung 8.10: Unterschiede der Oberflächenspannung und der dynamischen Viskosität für 5° C und 20° C

8.5 Bezug zu bodenmechanischen Kennwerten

8.5.1 Bodenmechanische Kennwerte

Bei den Versuchsreihen zur Messung der Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Konsistenz (Kap. 8.4.1) wurde auch jeweils die Masse des eingebauten Bodens bestimmt und daraus Zustandskennwerte abgeleitet (Tabelle 8.10). Die Standardabweichung der Massenbestimmung betrug jeweils < 1 % des Mittelwertes (Kap. 6.5).

Tabelle 8.10 Zustandskennwerte der Versuchstone

Versuchs- ton	Konsistenz- zahl I_c [-]	Wasser- gehalt w [%]	Trocken- dichte ρ_d [g/cm³]	Porenanteil n [%]	Luftporen- anteil n_a [%]	Porenziffer e [%]	Sättigungs- grad S_r [%]
KI-S	0,85	18,3	1,690	39,0	8,1	63,9	79,2
	0,95	16,4	1,780	35,7	6,5	55,6	81,8
	1,00	15,5	1,800	35,0	7,1	53,9	79,7
	1,41	8,0	1,890	31,8	16,6	46,6	47,6
KI-W	0,85	25,6	1,467	45,9	8,3	84,7	82,0
	0,95	23,0	1,545	43,0	7,4	75,3	82,7
	0,97	22,5	1,558	42,5	7,5	73,9	82,4
	1,00	21,7	1,575	41,9	7,7	72,1	81,6
	1,10	19,1	1,609	40,6	9,9	68,4	75,6
ISK-E	0,88	45,3	1,080	59,7	10,8	148,1	81,9
	0,92	43,0	n. best.	n. best.	n. best.	n. best.	n. best.
	0,97	40,2	n. best.	n. best.	n. best.	n. best.	n. best.
	1,03	36,8	1,210	54,9	10,3	121,5	81,2
	1,13	31,2	1,320	50,7	9,6	103,0	81,0
SI-B	0,85	44,6	1,103	60,3	11,1	152,0	81,6
	0,95	36,1	1,242	55,3	10,6	123,9	80,9
	1,00	31,8	1,328	52,2	10,0	109,4	80,8

8.5.2 Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der Trockendichte

Die Trockendichten sind in Abhängigkeit des Wassergehaltes in Abbildung 8.11 dargestellt. Darin sind auch die jeweiligen Adhäsionsspannungen dargestellt. Die Adhäsionsspannung steigt mit zunehmender jeweiliger Trockendichte der Böden, also mit abnehmendem Wassergehalt. Es kann kein Zusammenhang zwischen der Trockendichte und der Höhe der Adhäsionsspannungen angeleitet werden.

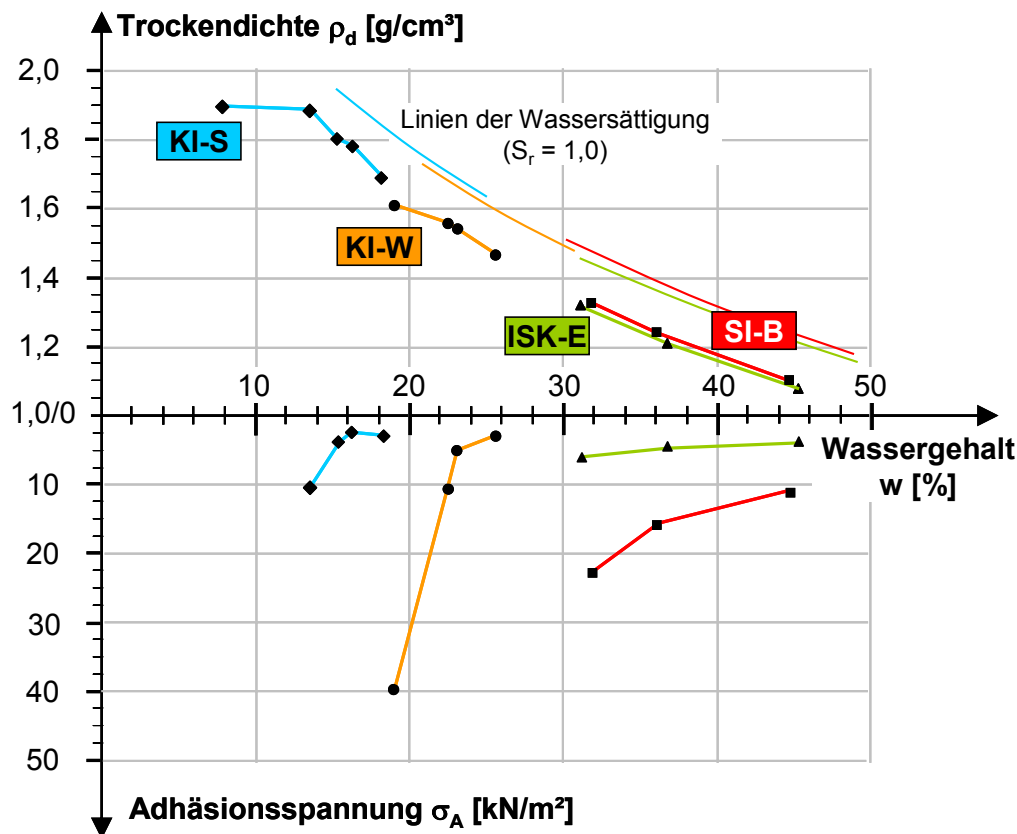


Abbildung 8.11: Mittlere Trockendichten und Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt ($\sigma_D = 20 \text{ kN/m}^2$)

8.5.3 Adhäsionsspannungen in Bezug zur Porenzahl und der Plastizität

Thewes [1999] findet innerhalb einer gewissen Schwankungsbreite einen linearen Zusammenhang zwischen der Plastizitätszahl I_P und der auf die Porenzahl e bezogenen Adhäsionsspannung $\sigma_{A(e)} = \sigma_A \cdot e$. Die Versuche zur Untersuchung der Abhängigkeit von der Konsistenz wurden für die Versuchstone KI-S, KI-W und SI-B vergleichbar ausgewertet (Abbildung 8.12). Es ergibt sich auch für die Versuchsreihen ein ungefähr linearer Zusammenhang. Allerdings ist die Anzahl der Werte zu gering, um hierzu eine belastbare Aussage zu treffen. Die Auswertung von Thewes [1999] scheint aber bestätigt werden zu können.

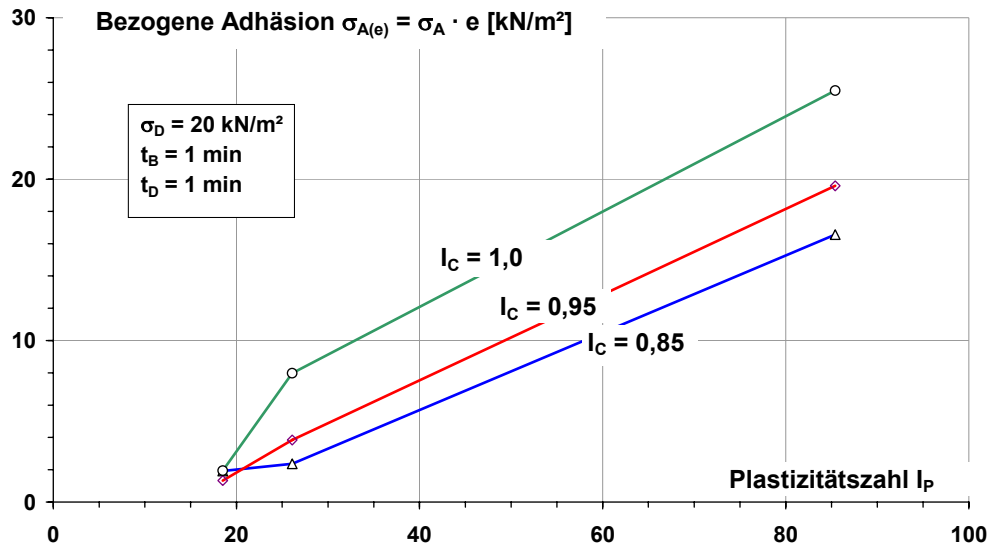


Abbildung 8.12: Bezoogene Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit von der Plastizität

8.5.4 Mittlere Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Permeabilität

Wie in Kapitel 10 noch ausgeführt wird, hat die Durchlässigkeit der Böden einen erheblichen Einfluss auf ihr Adhäsionsverhalten. Dieser Zusammenhang kann auch experimentell gezeigt werden. Dazu wurden die mittleren Adhäsionsspannungen in Abhängigkeit der Konsistenz (Kap. 8.4.1) für die Konsistenzzahlen $I_c = 0,85$; $0,95$ und $1,0$ den für die Konsistenzzahlen ermittelten Permeabilitäten (Kap. 7.4) gegenübergestellt (Abbildung 8.13).

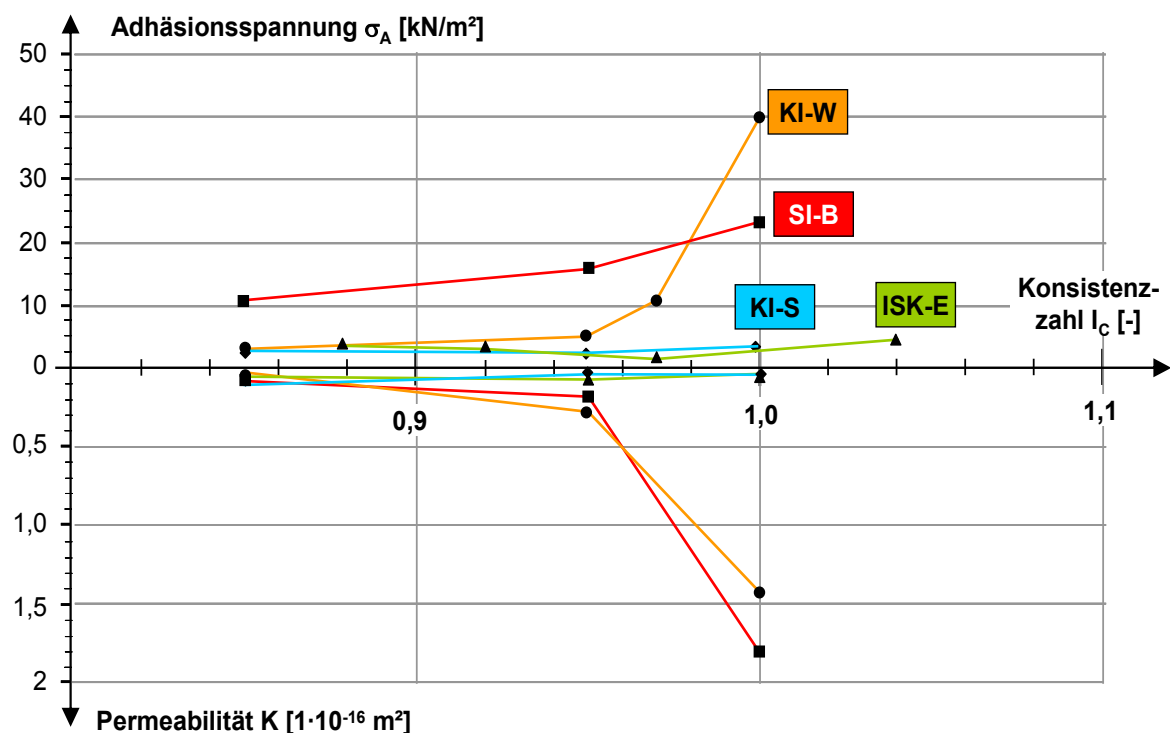


Abbildung 8.13: Adhäsionsspannungen und Permeabilitäten in Abhängigkeit von der Konsistenz

Die Versuchstone KI-W und SI-B, die sehr empfindlich auf Änderungen der Konsistenz reagieren und deren Adhäsionsspannungen mit zunehmender Konsistenzzahl deutlich steigen, zeigen auch eine entsprechend deutliche Zunahme ihrer Permeabilität. Die Versuchstone KI-S und ISK-E zeigen sich unempfindlich gegenüber Änderungen ihrer Konsistenz und auch keine wesentliche Änderung ihrer Permeabilität in diesem Konsistenzbereich.

Der Zusammenhang zwischen der Adhäsionsspannung und der Permeabilität ist damit experimentell untermauert.

8.6 Fehlerbetrachtung

Zur Bewertung der Abweichungen der Versuchsergebnisse vom jeweiligen Mittelwert der Versuchsreihen ist die Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung - ausgedrückt in Prozent der jeweiligen Mittelwerte – in Abbildung 8.14 dargestellt. Dazu wurden Standardabweichungen in Klassen mit einer Schrittweite von 5 % zusammengefasst und jeweils die Anzahl der Versuchsreihen zugeordnet.

Die Standardabweichungen betragen in der Regel bis 25 % des Mittelwertes (58 von 71 Versuchsreihen), wobei 45 Versuchsreihen Standardabweichungen bis 20 % des Mittelwertes zeigen. Die häufigsten Standardabweichungen betragen 10 – 15 % bzw. 15 – 20 % des Mittelwertes mit jeweils 14 Versuchsreihen, d.h. die Standardabweichung bei 28 von 70 Versuchsreihen liegt zwischen 10 % und 20 % des Mittelwertes.

Abweichungen vom Mittelwert größer als 25 % traten vor allem beim Versuchston SI-B auf. Dieser war beim Einbau in das Adhäsionsmessgerät beim Abziehen der Oberfläche schwierig zu handhaben. Das Herstellen einer glatten, homogenen Oberfläche war problematisch. Dies wird auf die enorme Plastizität dieses – industriell aufbereiteten – Tones zurückgeführt. Bei natürlichen Tönen kommen solche Plastizitäten in der Regel allerdings auch nicht vor.

Der Versuchston ISK-E, der ebenfalls eine sehr hohe Plastizität hat, zeigt tendenziell auch größere Standardabweichungen als die leicht- bzw. mittelplastischen Versuchstone KI-S und KI-W.

Ingesamt können Standardabweichungen größer als 25 % des Mittelwertes auf handwerkliche Schwierigkeiten zurückgeführt werden, welche durch die hohe Plastizität der Versuchstone ISK-E und SI-B begründet sind.

Der Behandlung der Tone und insbesondere die Behandlung der Probenoberfläche kommt daher im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse die entscheidende Bedeutung zu.

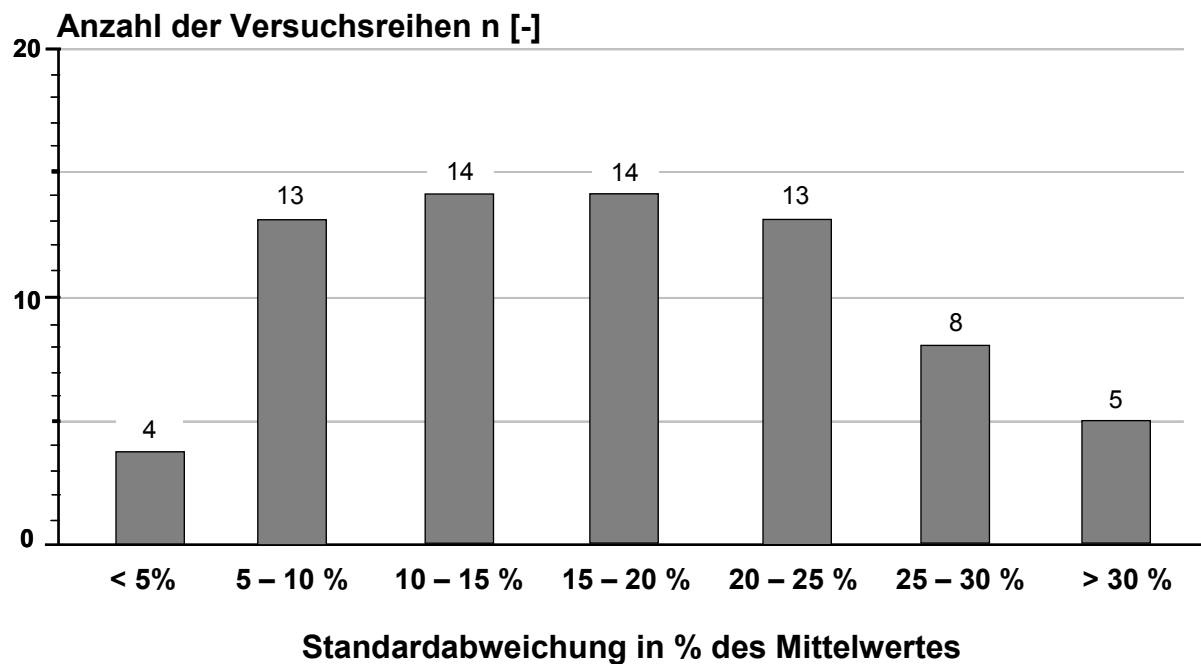


Abbildung 8.14: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung in Prozent des Mittelwertes der Versuchsreihen

Für eine industrielle Anwendung des Versuches im Rahmen von Baugrunderkundungen sollte der zulässige Fehler nicht mehr als 20 % bis max. 25 % des Mittelwertes betragen. Die zulässigen Abweichungen vom Mittelwert können ggf. in Abhängigkeit von der Plastizität gestaffelt werden. Hierzu sind weitere Erfahrungen mit einer größeren Anzahl von Versuchsreihen erforderlich.

9 Adhäsionsversuche mit Messung des Porenwasserdruckes

9.1 Versuchsbeschreibung

Für die Bewegung von Fluiden als maßgebender Prozess für die Entwicklung von Adhäsionsspannungen muss ein hydraulischer Gradient vorhanden sein. Dieser Gradient ist außer durch die Andruckspannung wesentlich durch das Matrixpotenzial Ψ_m des Bodens bestimmt (Potentialtheorie: siehe Kap. 10.3.1).

Zur Quantifizierung des Matrixpotenzials des Bodens wurden der Porenwasserdruck über die Probenhöhe während der Adhäsionsversuche in Versuchsreihen an den Tonen KI-S [Breuer, 2009], ISK-E [Deecke, 2008] und SI-B [Kowalew, 2008] bestimmt. Für Versuchsreihen am Versuchston KI-W stand nicht mehr genug Probenmaterial zur Verfügung.

Zur Messung des Porenwasserdruckes wurden Minitensiometer durch seitlich im Probenring angebrachte Bohrungen (Abbildung 9.1) in die Probe eingebaut. Um das Matrixpotenzial über die Probenhöhe zu bestimmen, wurden Bohrungen in drei verschiedenen Tiefen unterhalb der Probenoberfläche verwendet. Die Lagen diese Bohrungen sind als:

- Tensiometer 1: obere Bohrung, 1,6 cm unter Probenoberfläche,
- Tensiometer 2: mittlere Bohrung, 2,4 cm unter Probenoberfläche,
- Tensiometer 3: untere Bohrung, 3,2 cm unter Probenoberfläche

bezeichnet. Es wurde für jeden Versuch jeweils immer nur ein Tensiometer eingebaut, um eine gegenseitige Beeinflussung auszuschließen.

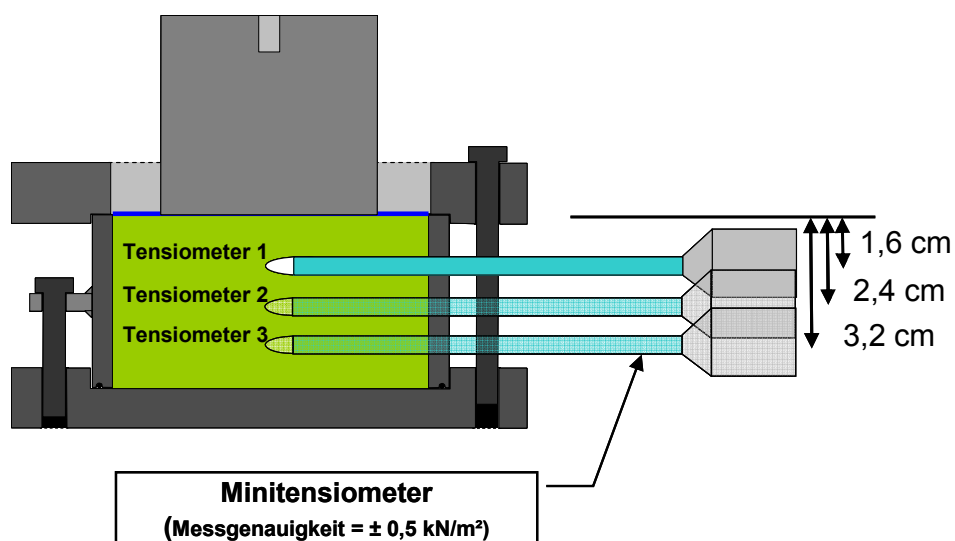


Abbildung 9.1: Versuchsaufbau Adhäsionsversuch mit Messung des Porenwasserdruckes

Ein Tensiometer besteht aus einer keramischen, porösen Membran, die über ein mit Wasser gefülltes Rohr, dem sog. Schaft, mit einem Drucksensor (Manometer) verbunden ist (Abbildung 9.2). Diese Membran ist wasser- aber nicht luftdurchlässig und wird daher auch als semipermeable Membran bezeichnet. Das Tensiometer wird so eingestellt, dass der Nullpunkt genau dann angezeigt wird, wenn das Tensiometer in einer Wasseroberfläche liegt. In einer hygroskopischen Umgebung, wie z.B. in einem ungesättigten Ton, besteht zwischen der Umgebung und dem Wasser im Inneren des Tensiometers ein Druckunterschied in der Membran. Dieser bewirkt eine Saugspannung im Wasser im Inneren des Tensiometers, welche als negativer Wasserdruck gemessen wird.

Für die Messungen wurde ein Minitensiometer der Fa. UMS mit einem Schaftdurchmesser von 5 mm eingesetzt (Abbildung 9.2). Die Messgenauigkeit beträgt nach den Angaben des Herstellers $\pm 0,5 \text{ kN/m}^2$. Bei diesem Tensiometer werden Porenwasser(-über)drücke mit negativem und Saugspannungen mit positivem Vorzeichen aufgezeichnet.

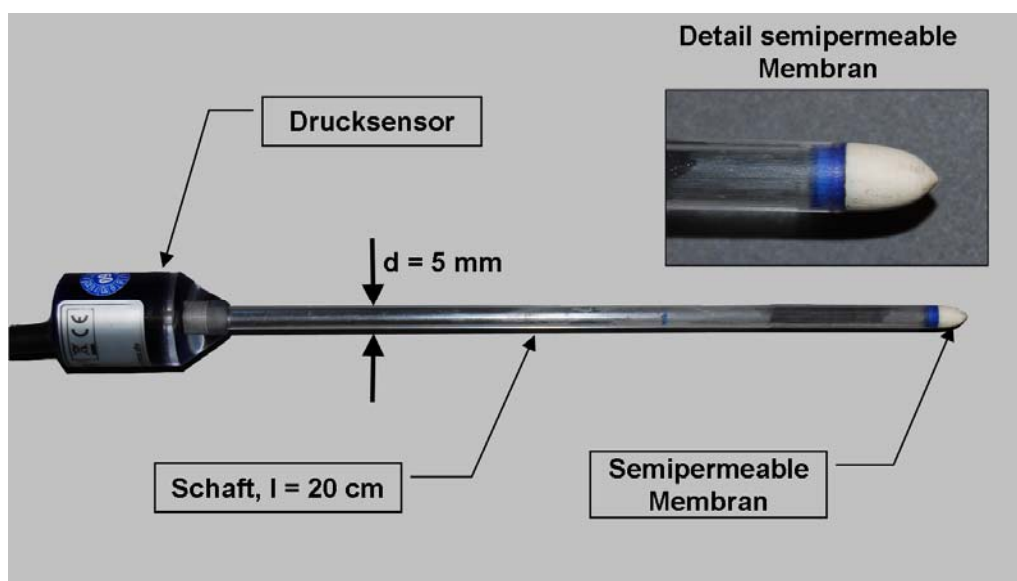


Abbildung 9.2: Minitensiometer

Zum Einbau des Tensiometers wurde der Versuchston nach dem beschriebenen Standardverfahren (Kap. 6) in den Probenring eingebaut. Die Bohrungen für den Probenring waren beim Einbau durch Schrauben verschlossen. Nach dem Einbau des Versuchstons wurde die Bohrung geöffnet und eine Führungshülse eingeschraubt (Abbildung 9.3). Anschließend wurde ein Kanal für den Tensiometer bis zur Mitte der Probe gebohrt. Der Innendurchmesser d_i der Führungshülse und der Durchmesser d der Bohrung betrugen 5 mm, entsprechend dem Durchmesser des Schaftes des Tensiometers.

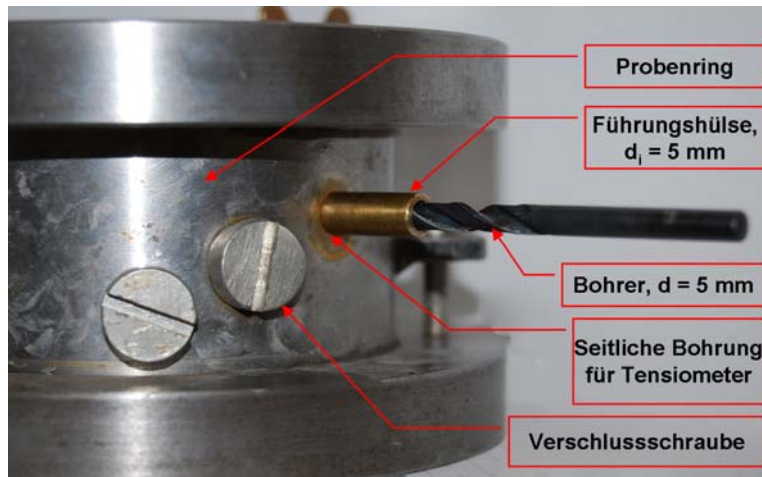


Abbildung 9.3: Herstellen der Bohrung für Tensiometer 1 durch Führungshülse

Unmittelbar nach dem Einbau des Tensiometers wurde das Adhäsionsmessgerät in die Prüfpresse eingebaut (Abbildung 9.4) und der Adhäsionsversuch durchgeführt.

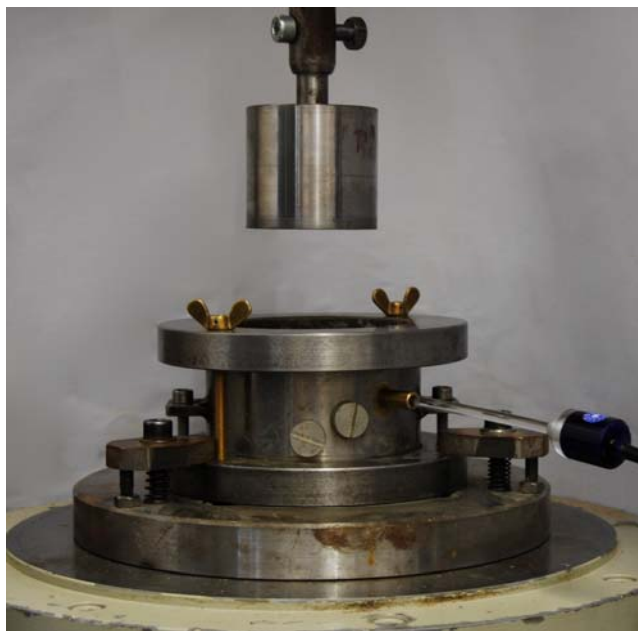


Abbildung 9.4: Adhäsionsversuch mit Messung des Porenwasserdruckes

9.2 Messungen des Porenwasserdruckes in Adhäsionsversuchen

9.2.1 Allgemein

Zur Darstellung der Ergebnisse werden die Porenwasserdrücke in Abhängigkeit von der Versuchsdauer aufgetragen. Positive Werte kennzeichnen dabei eine Saugspannung, negative Werte einen Porenwasserüberdruck. Die Saugspannung kann in diesen Fällen mit dem Matrixpotenzial (Kap. 10.3.1) gleichgesetzt werden.

9.2.2 Saugspannung der Versuchstone

Die Saugspannungen der Versuchstone wurden in Versuchen ohne Adhäsionsmessung in der obersten Lage (Tensiometer 1) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.5 dargestellt.

Die Dauer des Druckausgleiches zwischen der Flüssigkeit im Tensiometer und der im Boden ist sehr unterschiedlich. Der Druckausgleich stellt sich bei den hier gezeigten Versuchen nach mehreren Minuten ein. Die Dauer des Druckausgleiches ist aber sehr unterschiedlich. In anderen Versuchen hat es mehrere Stunden gedauert, bis sich die Drücke ausgeglichen haben [Deecke, 2008]. Ein Abwarten bis zum Druckausgleich kam bei den Adhäsionsversuche nicht in Frage, da sich einerseits die Versuchsbedingungen während der Wartezeit verändern und andererseits ein Einzelversuch u.U. mehrere Stunden oder Tage in Anspruch genommen hätte. In den Adhäsionsversuchen ist der Druck zwischen der Tensiometerflüssigkeit und der Umgebungsflüssigkeit daher noch nicht ausgeglichen. Es wird ein Ansteigen der Saugspannungen mit der Versuchsdauer gemessen.

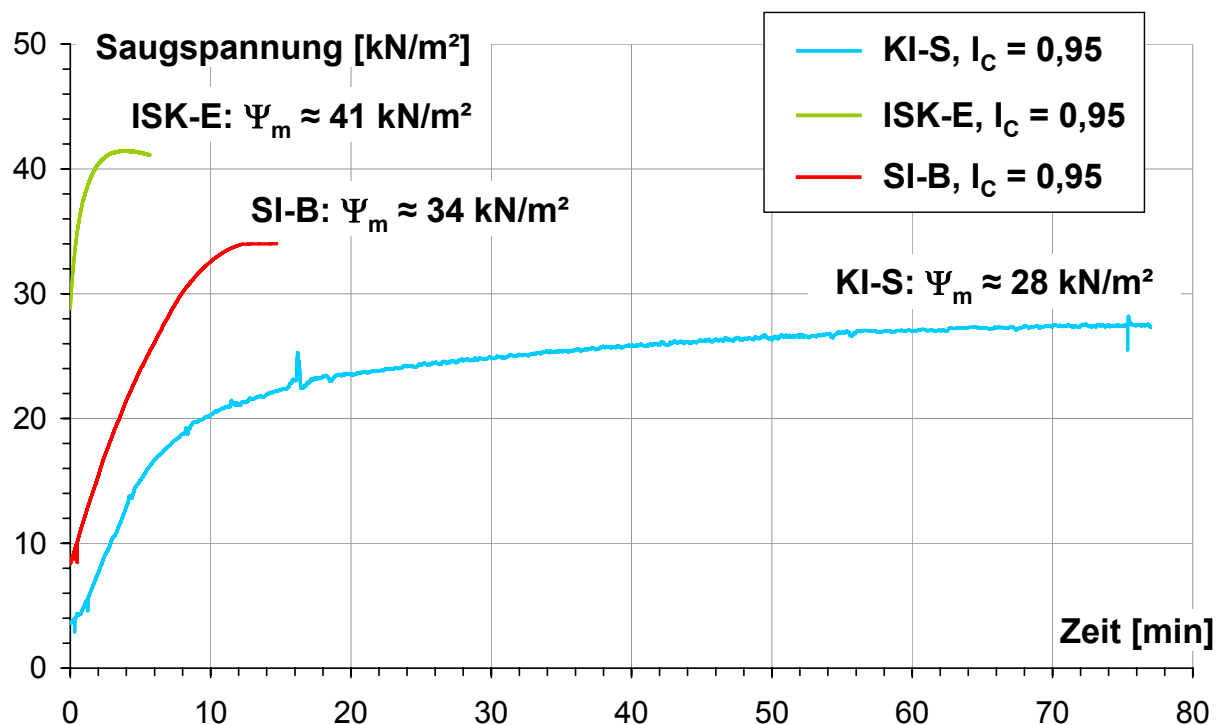


Abbildung 9.5: Saugspannung der Versuchstone KI-S, ISK-E und SI-B

Bei der gewählten Konsistenz betragen die Sättigungsgrade für diese Tone $S_r = \text{ca. } 79 - 83 \%$ (Kap. 8.5). Die von Scheffer & Schachtschnabel [1998] und von Schick [2003] beschriebenen Saugspannungen von Tonen für diese Sättigungsgrade liegen in der Größenordnung der hier gemessenen Saugspannungen. Die Messergebnisse werden daher als plausibel angesehen.

9.2.3 Porenwasserdruckmessungen am Versuchston SI-B

An dem Versuchston SI-B wurden acht Adhäsionsversuche mit Messung des Porenwasserdruckes durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.7 zusammenfassend dargestellt. Die Messergebnisse werden zunächst am Beispiel einer Messung für Tensiometer 1 (Abbildung 9.6) erläutert.

Die Messwerte zeigen zunächst einen Anstieg der Saugspannung. Zum Zeitpunkt $t = 100$ s wurde die Probenoberfläche benetzt. Eine Änderung der Entwicklung der Messwerte ist dabei nicht zu erkennen. Zum Zeitpunkt $t = 160$ s beginnt die Andruckphase mit einer Andruckspannung von $\sigma_D = 50$ kN/m². Die Saugspannung verringert sich dabei sprunghaft um etwa 4,5 kN/m². Dies entspricht etwa 9 % der Andruckspannung. Gegenüber der gemessenen Saugspannung von etwa 34 kN/m² entspricht dies einer Verringerung um etwa 13 %. Während der Andruckphase steigt die Saugspannung wieder an, wobei die Steigungsrate der vor Beginn der Andruckphase entspricht. Nach einer Andruckdauer $t_D = 100$ s beginnt die Eigengewichtsphase. Die Eigengewichtsspannung σ_E beträgt 4,3 kN/m². Hier zeigt die Kurve durch die Verringerung der in der Grenzfläche wirkenden Spannung von 50 kN/m² auf 4,3 kN/m² wieder einen sprunghaften Anstieg der Saugspannung um etwa 1 – 1,5 kN/m². Am Ende der Eigengewichtsphase nach $t_E = 40$ s folgt die Trennphase mit der Trennung von Adhäsionstestzylinder und Boden bei einer Adhäsionsspannung $\sigma_A = 18$ kN/m². Die Trennphase und die Trennung selber sind an den Messwerten allerdings kaum sichtbar.

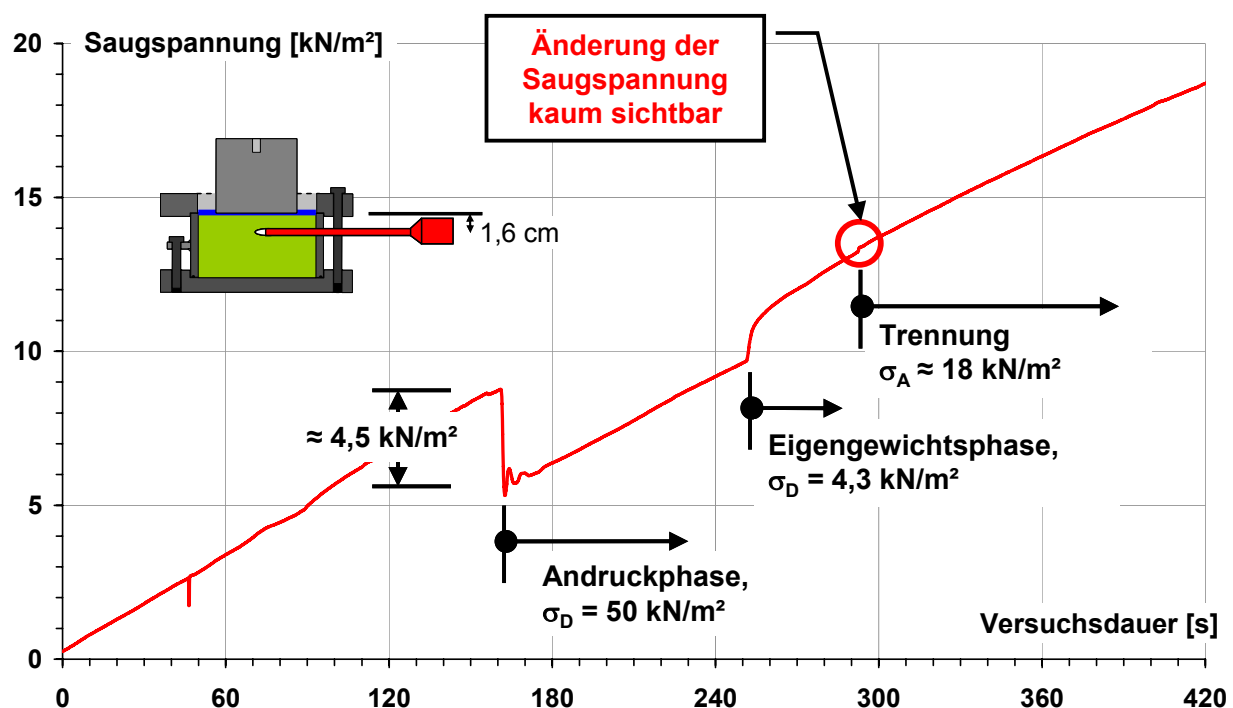


Abbildung 9.6: Porenwasserdruckmessung Versuchston SI-B, Tensiometer 1, $l_c = 0,95$, $\sigma_D = 50$ kN/m²

Die Messwerte für die Tensiometer 2 und 3 zeigen qualitativ den gleichen Verlauf (Abbildung 9.7). Allerdings sind die Änderungen der Saugspannungen infolge des Aufbringens der Andruckspannung und der Entlastung beim Beginn der Eigengewichtsphase nur schwach zu erkennen. Sie betragen weniger als $0,2 \text{ kN/m}^2$, was einer Verringerung von weniger als 1 % gegenüber der gemessenen Saugspannung von etwa 34 kN/m^2 entspricht. Die Ursache für diese sehr geringen Änderungen der Saugspannung in der mittleren (Tensiometer 2) und der unteren Lage (Tensiometer 3) liegt in der Zusammendrückbarkeit dieses Tons und der Ausbildung eines Druckgewölbes in der Probe. Die Spannungen werden dabei infolge der Ausbreitung der Vertikalspannungen im Boden in horizontaler Richtung auf den Probenring übertragen, so dass die unter dem Druckgewölbe liegenden Bereiche der Probe gering werden. Das Druckgewölbe ist eine Funktion der Scherfestigkeit und des Wandreibungswinkels zwischen Boden und Probenring, so dass es für jeden Boden anders ausfällt. Da bereits in 2,4 cm Tiefe unter der Probenoberfläche nur geringe Änderungen des Porenwasserdruckes registriert werden, dürfte das Druckgewölbe bei diesem Boden sehr flach ausgeprägt sein.

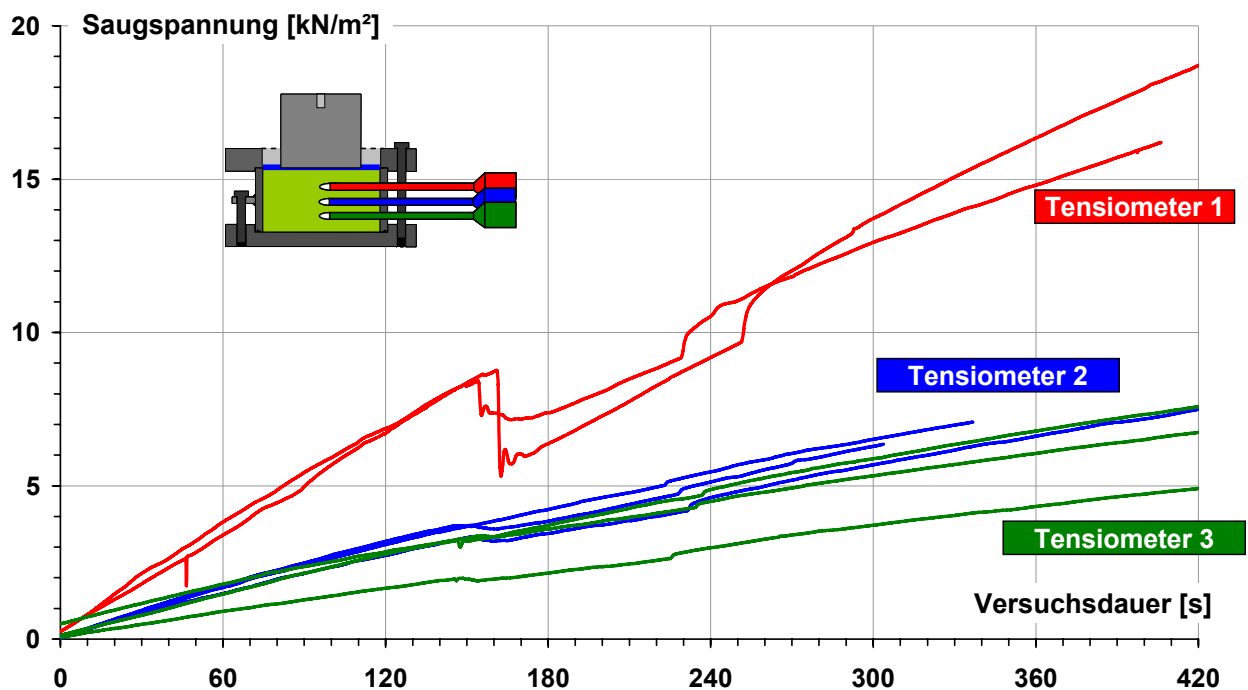


Abbildung 9.7: Porenwasserdruckmessungen Versuchston SI-B, Tensiometer 1, 2 und 3, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$

9.2.4 Porenwasserdruckmessungen am Versuchston ISK-E

An dem Versuchston ISK-E wurden sechs Adhäsionsversuche mit Messung des Porenwasserdruckes durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.8 zusammenfassend dargestellt.

Die Porenwasserdrücke im Versuchston ISK-E zeigen qualitativ grundsätzlich ein vergleichbares Verhalten wie die des Versuchstons SI-B hinsichtlich der Änderungen beim Aufbringen der Andruckspannungen, bzw. beim Übergang von der Andruck- zur Eigengewichtsphase. Allerdings finden die Änderungen nicht sprunghaft statt. Vielmehr ist eine deutliche Zeitabhängigkeit zu erkennen. Auch ist bei diesem Ton die Änderung der Porenwasserdrücke für die Tensiometer 2 und 3 bei Beginn der Andruckphase und der Eigengewichtsphase wesentlich ausgeprägter.

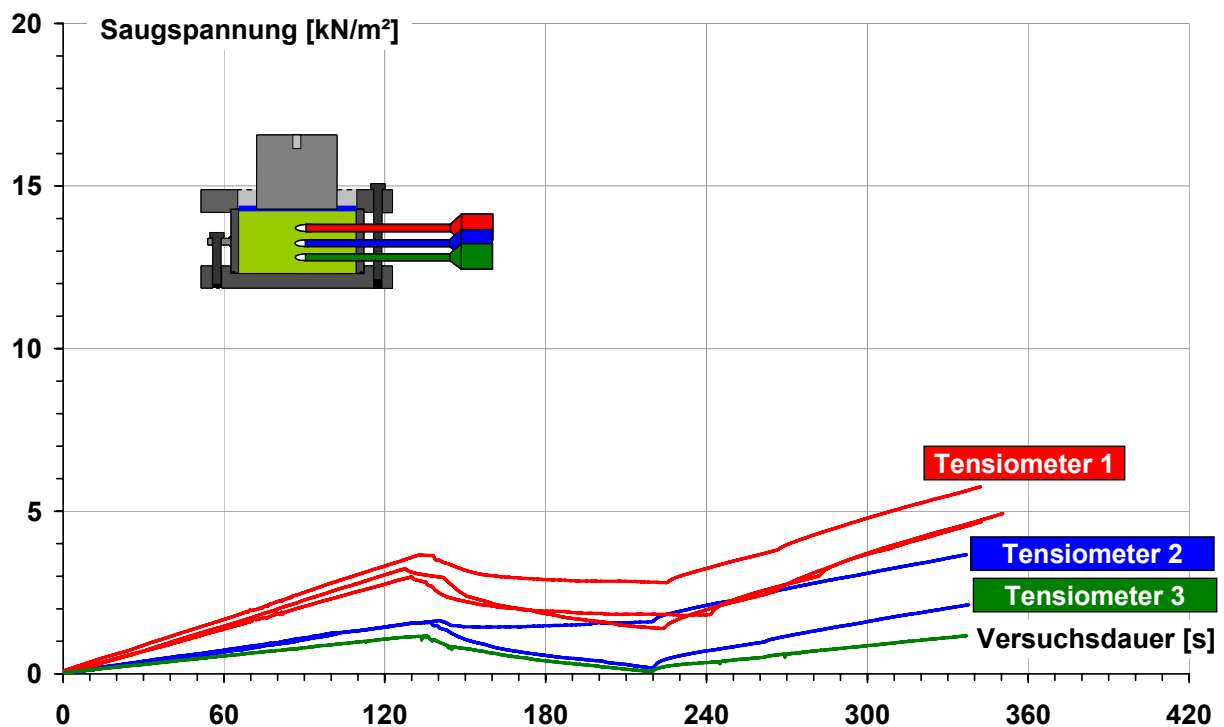


Abbildung 9.8: Porenwasserdruckmessungen Versuchston ISK-E, Tensiometer 1, 2 und 3, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$

Die Ergebnisse werden auch hier wiederum für den Tensiometer 1 eingehender erläutert (Abbildung 9.9). Die Messwerte zeigen zunächst einen Anstieg der Saugspannung. Zum Zeitpunkt $t = 70 \text{ s}$ wurde die Probenoberfläche benetzt. Eine Änderung der Entwicklung der Messwerte dadurch ist auch hier nicht zu erkennen. Zum Zeitpunkt $t = 130 \text{ s}$ beginnt die Andruckphase mit einer Andruckspannung von $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$. Die Saugspannung verringert sich dabei langsam bis zum Ende der Eigengewichtsphase um etwa $2,7 \text{ kN/m}^2$. Dies entspricht etwa 5 % der Andruckspannung. Gegenüber der gemessenen Saugspannung von etwa 41 kN/m^2 entspricht dies einer Verringerung um etwa 7 %. Nach einer Andruckdauer $t_D = 110 \text{ s}$ beginnt die Eigengewichtsphase. Hier zeigt die Kurve durch die Verringerung der in der Grenzfläche wirkenden Spannung von 50 kN/m^2 auf $4,3 \text{ kN/m}^2$ wieder einen – allerdings langsamen Anstieg der Saugspannung. Am Ende der Eigengewichtsphase nach $t_E = 40 \text{ s}$ folgt

die Trennphase mit der Trennung von Adhäsionstestzylinder und Boden bei einer Adhäsionsspannung $\sigma_A = 6,5 \text{ kN/m}^2$. Die Trennphase und die Trennung selber sind an den Messwerten wie beim Versuchston SI-B kaum sichtbar.

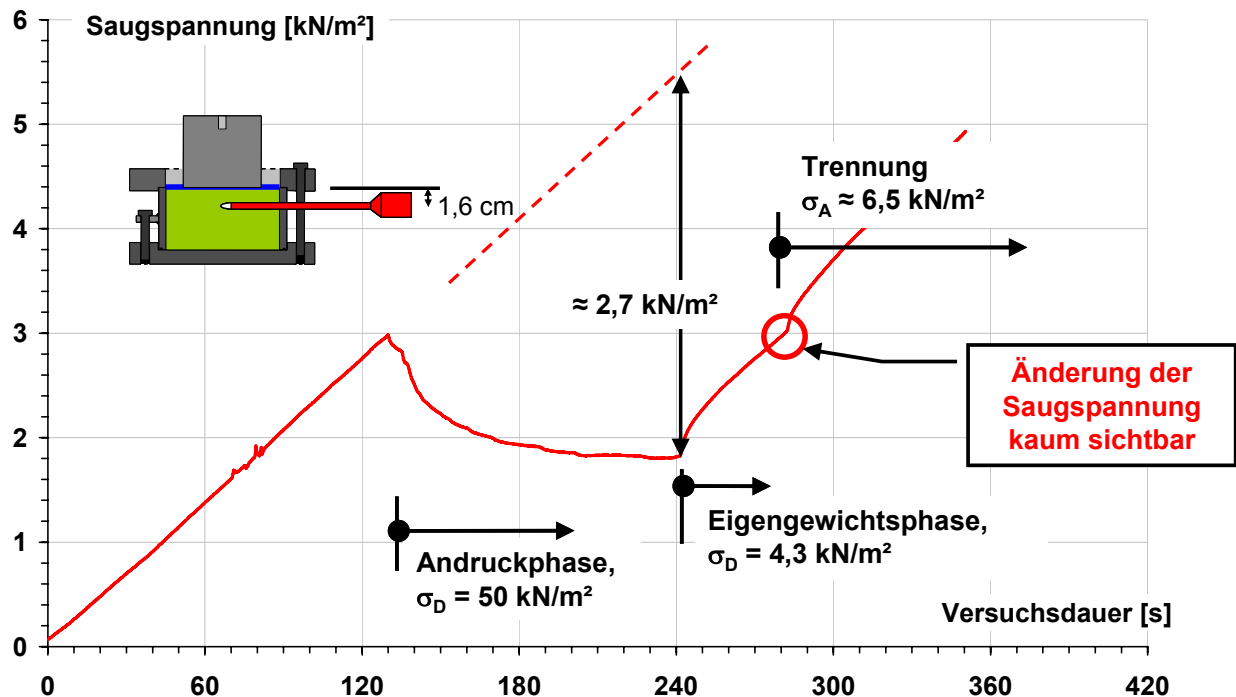


Abbildung 9.9: Porenwasserdruckmessung Versuchston ISK-E, Tensiometer 1, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$

9.2.5 Porenwasserdruckmessungen am Versuchston KI-S

An dem Versuchston KI-S wurden neun Adhäsionsversuche mit Messung des Porenwasserdruckes durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.11 zusammenfassend dargestellt. Die Messergebnisse werden zunächst am Beispiel einer Messung für Tensiometer 1 (Abbildung 9.10) erläutert.

Die Messwerte zeigen zunächst einen Anstieg der Saugspannung. Zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ wurde die Probenoberfläche benetzt. Eine Änderung der Entwicklung der Messwerte ist hier nicht zu erkennen. Zum Zeitpunkt $t = 65 \text{ s}$ beginnt die Andruckphase mit einer Andruckspannung von $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$. Dabei zeigt die Kurve über einen Zeitraum von etwa 15 s einen Absatz. Dieser ist in diesem Versuch auf technische Probleme beim Einstellen der Andruckspannung zurückzuführen und nicht physikalisch begründet.

Die Saugspannung verringert sich dabei mit dem Anlegen der Andruckspannung sprunghaft um etwa 28 kN/m^2 . Dies entspricht etwa 56 % der Andruckspannung. Die gemessene

Saugspannung (das Matrixpotenzial) von etwa 28 kN/m² wird dadurch auf Null oder negative Werte (also Porenwasserüberdruck) reduziert.

Während der Andruckphase steigt die Saugspannung an, wobei die Steigungsrate der vor Beginn der Andruckphase entspricht. Nach einer Andruckdauer $t_D = 75$ s beginnt die Eigengewichtsphase. Die Eigengewichtsspannung σ_E beträgt 4,3 kN/m². Hier zeigt die Kurve durch die Verringerung der in der Grenzfläche wirkenden Spannung von 50 kN/m² auf 4,3 kN/m² wieder einen sprunghaften Anstieg der Saugspannung um etwa 28 kN/m².

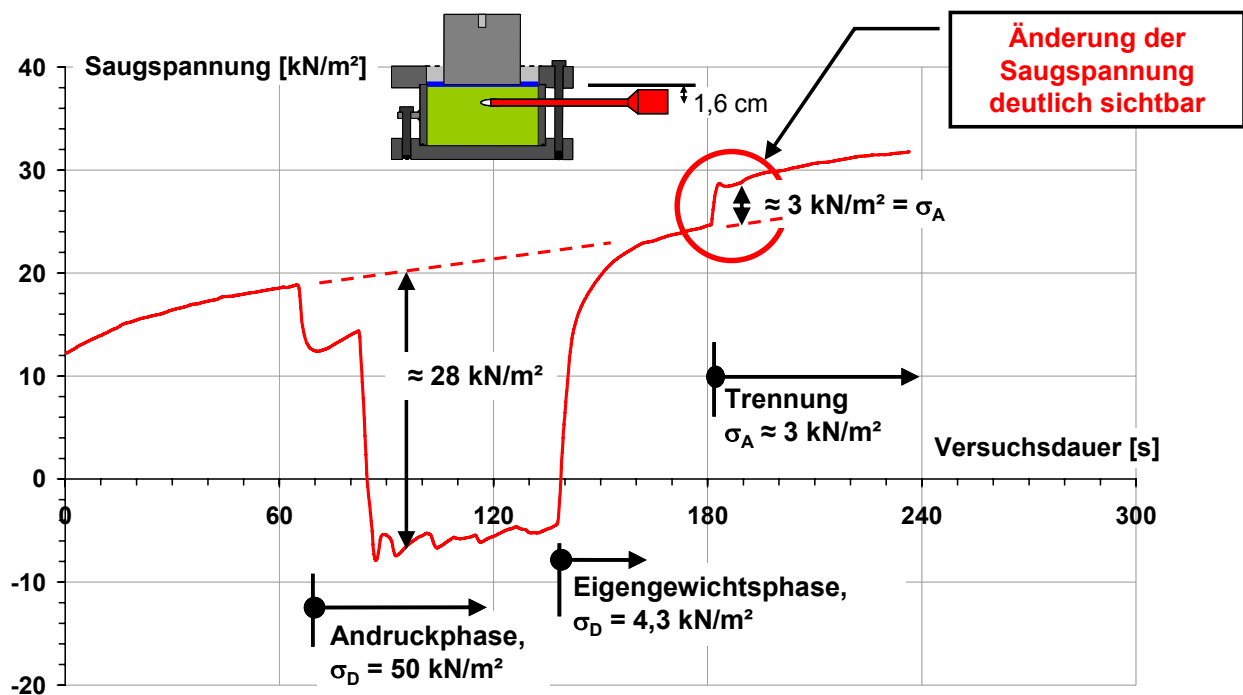


Abbildung 9.10: Porenwasserdruckmessung Versuchston KI-S, Tensiometer 1, $l_C = 0,95$, $\sigma_D = 50$ kN/m²

Am Ende der Eigengewichtsphase nach $t_E = 40$ s folgt die Trennphase mit der Trennung von Adhäsionstestzylinder und Boden bei einer Adhäsionsspannung $\sigma_A = 3$ kN/m². Die Saugspannung vergrößert sich am Zeitpunkt der Trennung um 3 kN/m². Dieser Betrag entspricht der gemessenen Adhäsionsspannung. Die Trennphase und die Trennung selber sind im Gegensatz zu den Versuchen an den Versuchstonen SI-B und ISK-E deutlich sichtbar.

Die Messwerte für die Tensiometer 2 und 3 zeigen qualitativ und quantitativ einen ähnlichen Verlauf wie bei Tensiometer 1 (Abbildung 9.11). Bei allen Messungen ist die Trennung deutlich zu erkennen und entspricht der jeweils gemessenen Adhäsionsspannung.

Bei einigen Messungen betrugen die Änderungen der Saugspannung beim Aufbringen der Andruckspannung auch über 28 kN/m² bis fast 40 kN/m². Es ist daher davon auszugehen, dass

sich in der Probe ein Porenwasserüberdruck einstellt. Offenbar spielt bei diesem Versuchston das Spannungs-Dehnungsverhalten bzw. das Konsolidationsverhalten eine erhebliche, und nicht wie bei den Versuchstonen ISK-E und SI-B eine vernachlässigbare Rolle.

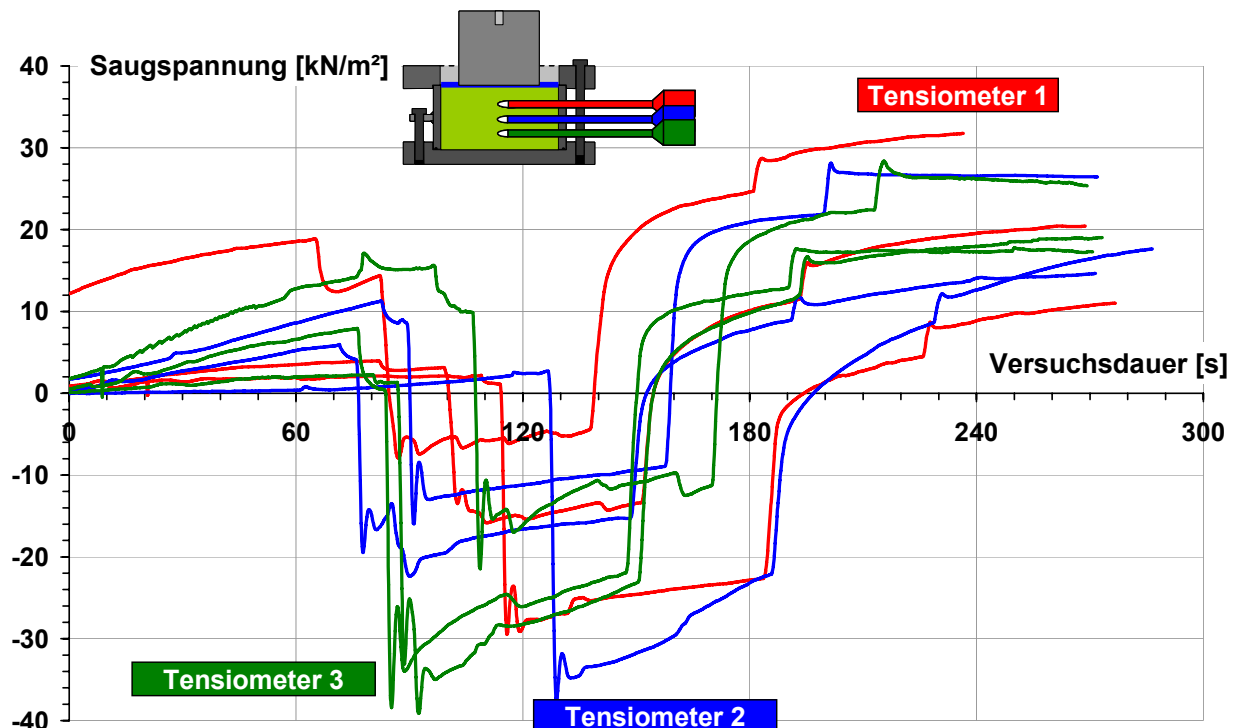


Abbildung 9.11: Porenwasserdruckmessungen Versuchston KI-S, Tensiometer 1, 2 und 3, $I_C = 0,95$, $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$

9.2.6 Bewertung der Porenwasserdruckmessungen

Der Porenwasserdruck reagiert qualitativ höchst unterschiedlich. Die beiden ausgeprägt plastischen Tone ISK-E und SI-B reagieren vergleichsweise schwach auf Änderungen des Spannungszustandes. Bereits in einer Tiefe von nur 1,6 cm unter der Probenoberfläche stellt sich auch bei einer vergleichsweise großen Andruckspannung von 50 kN/m^2 kein Porenwasserüberdruck ein. Es wird eine Saugspannung gemessen, so dass vielmehr ungesättigte Verhältnisse nachgewiesen werden.

Der leichtplastische Ton KI-S reagiert hingegen über die gesamte Höhe der Probe äußerst sensibel auf Änderungen des Spannungszustandes. Dabei wird ein Porenwasserüberdruck gemessen. Dieser entspricht aber auch nicht dem Betrag der Andruckspannung. Offenbar hat die Verformbarkeit bzw. das Konsolidationsverhalten des Tons einen erheblichen Einfluss.

10 Bodenphysikalisches Adhäsionsmodell

10.1 Annahmen

Die Versuche ohne gezielte Benetzung der Probenoberfläche (Kap. 8.4.5) und die Versuche bei einer Temperatur von 5°C (Kap. 0) zeigen, dass der Flüssigkeitsfilm in der Grenzfläche maßgebend für das Auftreten und die Größe der Adhäsionsspannung ist. Wie in Kap. 3 gezeigt wurde, ist für die Größe der Adhäsionsspannungen die Dicke dieses Flüssigkeitsfilmes maßgebend. Die Dicke dieses Flüssigkeitsfilmes kann auch durch die Menge der Flüssigkeit beschrieben werden. Die Versuche zeigen, dass sich diese während eines Versuches ändert.

Dem im folgenden beschriebenen Kapillar-Strömungsmodell liegt die Annahme zugrunde, dass die Flüssigkeit während eines Versuches einerseits in der Andruck- und der Eigengewichtsphase in den Versuchston hineintransportiert und andererseits in der Trennphase auch wieder aus dem Versuchston heraus zurück in die Grenzfläche transportiert wird. Die maßgebenden Parameter für diesen Prozess sind der hydraulische Gradient und die Permeabilität des Versuchstons.

10.2 Modell für den Flüssigkeitstransport

Nach dem Einbau des Versuchsbodens wird die Oberfläche benetzt. Infolge der Saugspannung des Tons kommt es mit dem Volumenstrom Q_B zu einem Transport der Benetzungsflüssigkeit in den Boden hinein (Abbildung 10.1).

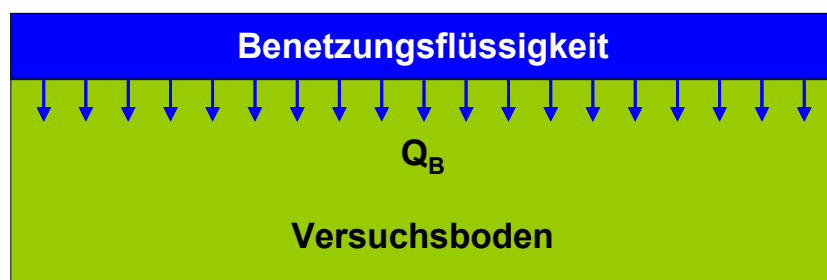


Abbildung 10.1: Flüssigkeitstransport in der Benetzungsphase

Mit dem Andrücken des Adhäsionstestzylinders beginnt die Andruckphase. Dabei wird die Flüssigkeit zunächst seitlich aus der nun entstehenden Grenzfläche verdrängt (Abbildung 10.2). Der Adhäsionstestzylinder wird mit der Andruckspannung σ_D auf die Oberfläche der Probe gedrückt.

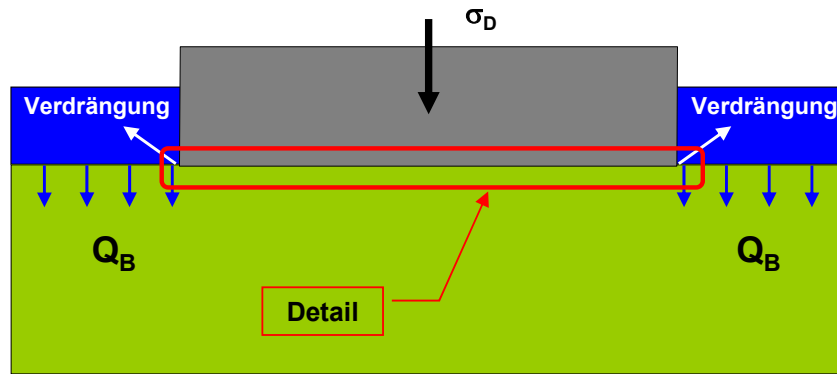


Abbildung 10.2: Beginn der Andruckphase

Durch das Aufbringen der Andruckspannung verformt sich der Versuchsboden plastisch und der Adhäsionstestzylinder wird etwas in die Probe hineingedrückt (Abbildung 10.3). Die Tiefe des Eindrucks ist abhängig von der Größe der Andruckspannung und den Verformungseigenschaften des Versuchsbodens. Sie beträgt nach Beobachtungen bei den Versuchen bis zu einer Andruckspannung von $\sigma_D \approx 100 \text{ kN/m}^2$ weniger als ca. 0,2 mm.

Es kommt zu der Ausbildung einer Grenzfläche mit einem eingeschlossenen Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$.

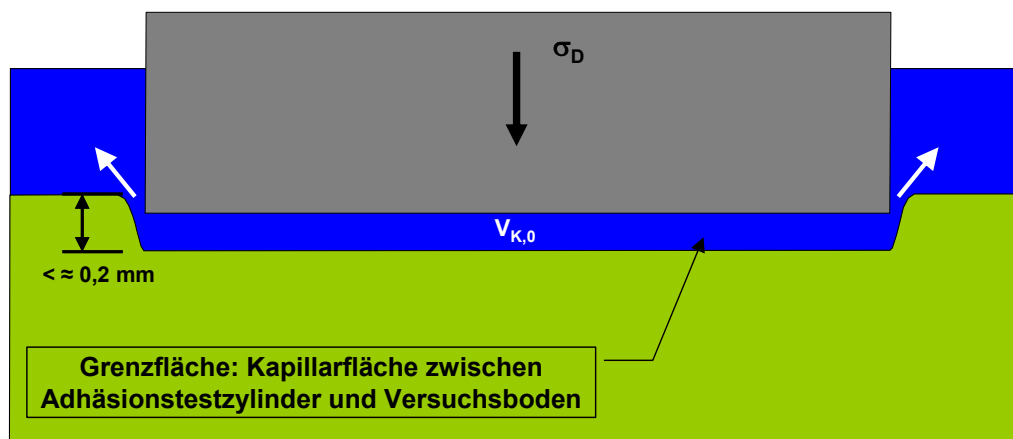


Abbildung 10.3: Detail: Aufdrücken des Adhäsionstestzylinders auf die Oberfläche der Probe

Nach dem Abziehen des Adhäsionstestzylinders ist dessen Eindruckrand in der Probenoberfläche deutlich erkennbar (Abbildung 10.4). Bei den Versuchen mit hohen Andruckspannungen (über 100 kN/m^2) war die Eindrücktiefe wesentlich größer. Sie betrug in diesen Versuchen einige Millimeter.

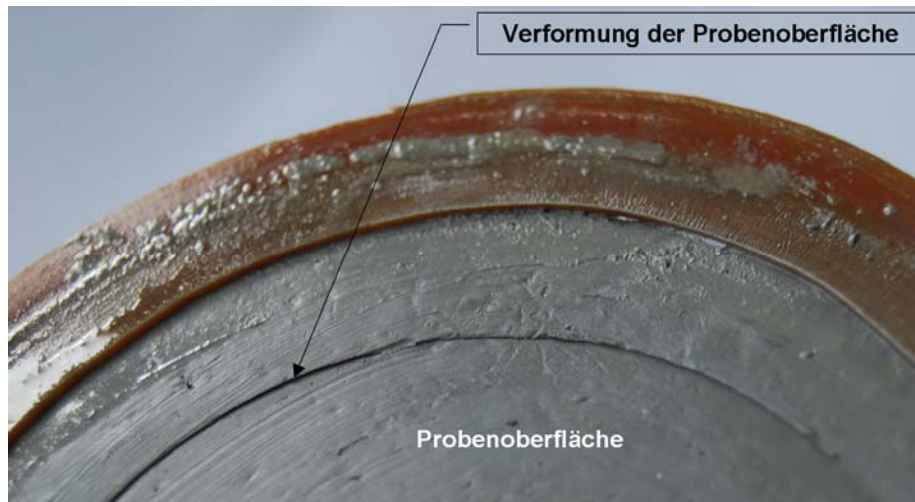


Abbildung 10.4: Probenoberfläche nach Abziehen des Adhäsionstestzylinders

In den folgenden Ausführungen wird nur noch die Grenzfläche betrachtet. Während der Andruckphase wird Flüssigkeit aus der Grenzfläche heraus in den Versuchsboden hineintransportiert. Dabei stellt sich der Volumenstrom Q_D ein (Abbildung 10.5). Am Ende der Andruckphase hat sich das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ um die transportierte Flüssigkeitsmenge $\Delta V_{K,D}$ verringert.

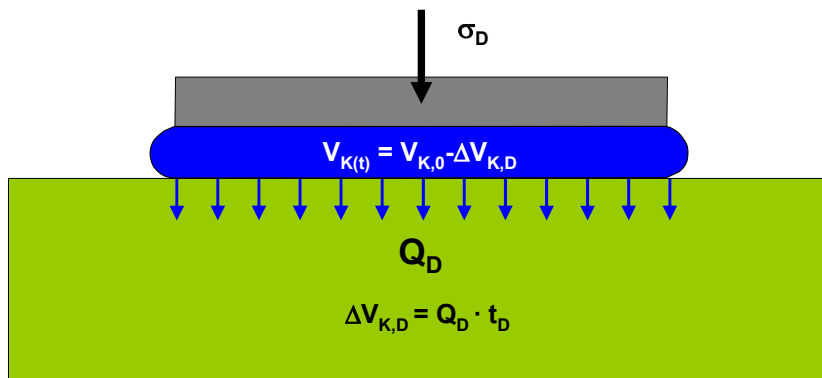


Abbildung 10.5: Flüssigkeitstransport in der Andruckphase

In Abhängigkeit der Andruckspannung, des Sättigungsgrades und des Konsolidationsverhaltens des Bodens kann allerdings auch ein Flüssigkeitstransport in die umgekehrte Richtung durch Auspressen des Porenwassers stattfinden. Dies kann z.B. bei weichen Konsistenzen der Böden der Fall sein. In diesem Fall wird das Anfangsvolumen der Kapillarflüssigkeit nicht verringert, sondern vergrößert.

In der Eigengewichtphase (Abbildung 10.6) herrschen prinzipiell ähnliche Verhältnisse wie in der Andruckphase. Es stellt sich ein Volumenstrom Q_E ein, der zu einer Verringerung des Anfangsvolumens der Kapillarflüssigkeit um die Menge $\Delta V_{K,E}$ führt.

Allerdings kann auch in dieser Phase infolge der Verringerung der Spannungen in der Grenzfläche und durch die oben bereits beschriebenen Randbedingungen ein Transport von Flüssigkeit aus der Probe heraus in die Grenzfläche hinein stattfinden. Im Rahmen dieser Betrachtung wird aber ein Transport der Flüssigkeit aus der Grenzfläche heraus unterstellt.

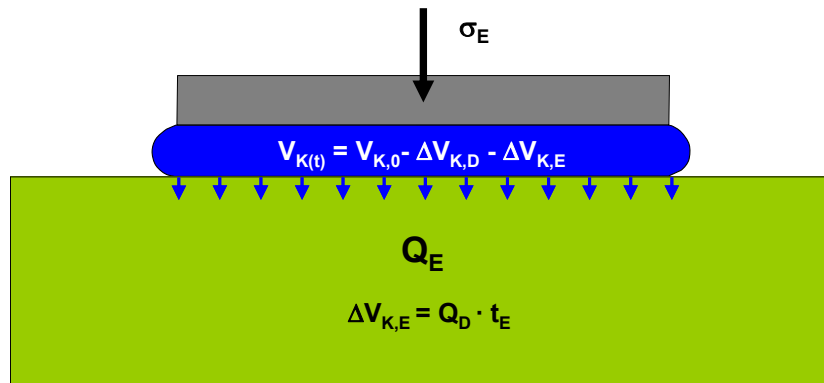


Abbildung 10.6: Flüssigkeitstransport in der Eigengewichtsphase

In der anschließenden Trennphase wirkt nun eine Zugkraft auf den Adhäsionstestzylinder. Dieser Zugkraft wirken die Kapillarkräfte (siehe Kap. 3) entgegen (Abbildung 10.7). Es entsteht so ein Kapillardruck, der auf den Boden, bzw. das Porenwasser eine entsprechende Zugspannung ausübt. Dadurch kommt es zu einem Transport von Flüssigkeit aus dem Boden heraus in die Grenzfläche hinein. Das Flüssigkeitsvolumen in der Grenzfläche wird dadurch um den Betrag $\Delta V_{K,T}$ vergrößert.

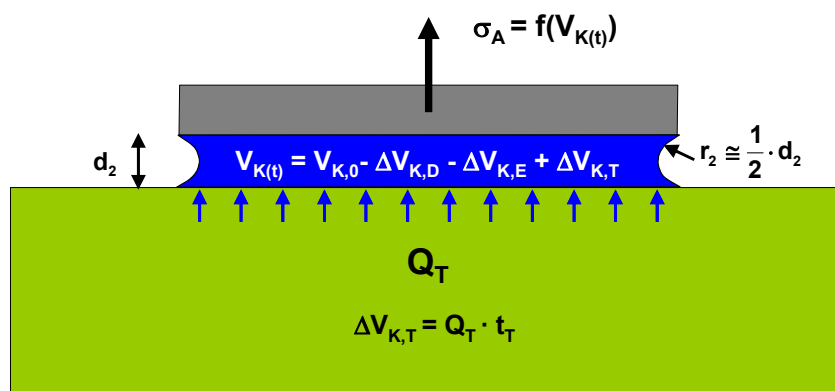


Abbildung 10.7: Flüssigkeitstransport in der Trennphase

10.3 Potenzialentwicklung während des Adhäsionsversuches

10.3.1 Potenzialtheorie

Der Transport der Flüssigkeit kann quantitativ mit Hilfe der Potenzialtheorie veranschaulicht werden. Mit der Potenzialtheorie wird die Arbeitsfähigkeit des im Boden enthaltenen Wasser beschrieben [Hartge & Horn, 1999; Scheffer & Schachtschnabel, 1998; Koorevaar et al., 1983]. Das Potenzial ist hier definiert als „die Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Wasser von einem gegebenen Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren. Diese Arbeit entspricht derjenigen, die notwendig ist, um die Mengeneinheit Wasser von einer freien Wasserfläche auf eine bestimmte Höhe in einer Pore (Kapillare) zu heben oder dieser der Bodenmatrix zu entziehen“ [Scheffer & Schachtschnabel, 1998]. Es werden dabei verschiedene Teilpotenziale unterschieden, wobei die Summe der Teilpotenziale das Gesamtpotenzial eines Bodens ergibt.

Die Arbeit, die notwendig ist, um Wasser auf ein bestimmtes Niveau zu heben, wird als Gravitationspotenzial Ψ_z bezeichnet [Hartge & Horn, 1999; Scheffer & Schachtschnabel, 1998; Koorevaar et al., 1983]. Unterhalb einer freien Wasseroberfläche entspricht der Betrag des Gravitationspotenzials dem hydrostatischen Druck entsprechend der Wichte des Wassers γ_{Wasser} und der betrachteten Wassertiefe z (Gln. 10.1).

$$\Psi_z = \gamma_{\text{Wasser}} \cdot z \quad (\text{Gln. 10.1})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
Ψ_z	: Gravitationspotenzial	Kraft / Länge ²	[kN/m ²] oder [mWs]
γ_{Wasser}	: Wichte des Wassers	Kraft / Länge ³	[kN/m ³]
z	: Tiefe	Länge	[m]

Das Gravitationspotenzial wird im Rahmen dieser Arbeit unterhalb einer freien Wasseroberfläche positiv und oberhalb negativ definiert. Ähnlich dem Gravitationspotenzial wird das Druckpotenzial Ψ_p definiert, wobei für einen bestimmten Punkt im Gegensatz hierzu nicht das Eigengewicht der überlagernden Wassersäule, sondern ein äußerer Druck ursächlich ist.

Das Matrixpotenzial Ψ_m beschreibt die Arbeit, die für eine Überführung des durch die Matrix der Bodenkörner kapillar oder adsorptiv gebundenen Wassers in frei bewegliches Wasser [Schick, 2003] erforderlich ist. Dabei sind die wasserhaltenden Kräfte der Bodenmatrix umso größer, je weniger Wasser ein Boden enthält. Mit sinkendem Wassergehalt steigt das Matrixpotenzial und es ist umso schwerer, dem Boden Wasser so zu entziehen, dass es als

freies Wasser zu Verfügung steht. Das Matrixpotenzial entspricht einem negativen hydrostatischen Druck.

Das Matrixpotenzial steigt einerseits mit zunehmender Wasseradsorptionsfähigkeit der Bodenkörner und andererseits mit abnehmendem Durchmesser der Kapillaren des Bodens, d.h. mit abnehmendem Porenvolumen. Böden mit einer hohen spezifischen Oberfläche der Bodenmatrix und mit hoher elektrischer Ladung der Kornoberflächen können dabei potenziell mehr Wasser adsorbieren als solche mit geringerer spezifischer Oberfläche und geringerer Oberflächenladung. Ein locker gelagerter Boden mit großen Porenradien kann kapillar schwächer Wasser binden als ein dichter gelagerter mit kleinen Porenradien. Aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche und ihrer Oberflächenladung zeigen Tone im Vergleich zu anderen Böden ein entsprechend größeres Wasseraufnahmevermögen [Kézdi, 1969; von Soos, 2001] und damit – bei vergleichbarem, auf das Porenvolumen bezogenen Wassergehalt - ein höheres Matrixpotenzial (Abbildung 10.8). Tonböden, die quellfähige Tonminerale enthalten, können Wasser auch in ihren Zwischenschichten intrakristallin oder interkristallin binden und zeigen eine höhere Wasseraufnahme und damit - bei vergleichbarem, auf das Porenvolumen bezogenem Wassergehalt - ein höheres Matrixpotenzial als Tonböden ohne quellfähige Tonminerale.

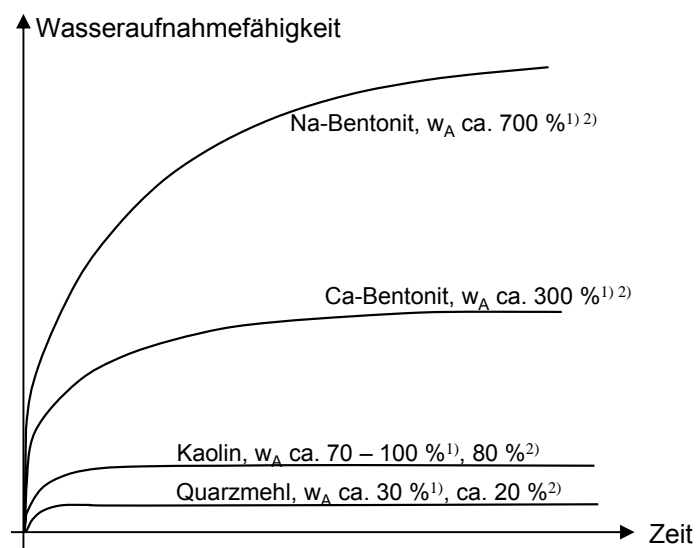


Abbildung 10.8: Wasseraufnahme verschiedener Tone und von Quarzmehl [verändert und ergänzt nach Kézdi¹⁾, 1969 und von Soos²⁾, 2001]

Die Auswirkungen des Matrixpotenzials sind dem des Gravitationspotenzials entgegengesetzt. Das Matrixpotenzial wird daher im Rahmen dieser Arbeit unterhalb einer freien Wasseroberfläche negativ und oberhalb positiv definiert.

Die in Kap. 9 beschriebenen Saugspannungen der Versuchstone entsprechen deren jeweiligem Matrixpotenzial.

Die im Porenvolumen eines Bodens enthaltene Wassermenge und das Matrixpotenzial hängen voneinander ab [Scheffer, Schachtschnabel, 1998]. Die Beziehung zwischen Wassermenge und Matrixpotenzial wird als Wasserspannungskurve oder pF-Kurve bezeichnet und ist für jeden Boden charakteristisch. Das Matrixpotenzial kann dabei in verschiedenen Einheiten angegeben werden. Gebräuchlich ist die Angabe in [hPa] oder in [cm Wassersäule] bzw. deren dekadischer Logarithmus, abgekürzt mit der Bezeichnung „pF“. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Einheit [kN/m²] und [m Wassersäule] verwendet. In Abbildung 10.9 sind charakteristische Matrixpotenziale für Sand-, Schluff- und Tonböden dargestellt [Scheffer, Schachtschnabel, 1998].

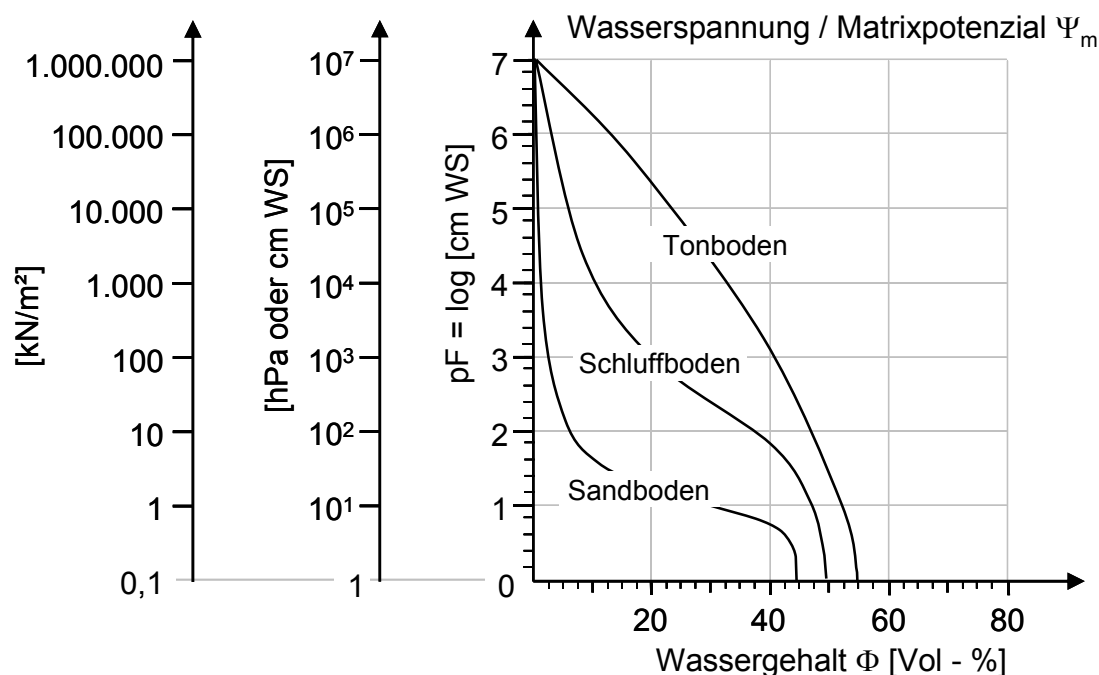


Abbildung 10.9: Charakteristische Matrixpotenziale von Sand-, Schluff- und Tonböden, [verändert und ergänzt nach Scheffer & Schachtschnabel, 1998]

Neben diesen drei Teilpotenzialen werden noch osmotische Potenziale Ψ_o und Gaspotenziale Ψ_g unterschieden [Scheffer & Schachtschnabel, 1998]. Diese werden allerdings im Rahmen dieser Arbeit für die Beschreibung der Transportvorgänge nicht weiter benötigt.

Der Zusammenhang zwischen den Teilpotenzialen ist in Abbildung 10.10 bis Abbildung 10.12 dargestellt. Stellt man einen mit einem trockenen Boden (Abbildung 10.10, Sättigungsgrad $S_r = 0$) gefüllten, oben abgedeckten Zylinder in ein Wassergefäß, fließt das Wasser zunächst bis zu einer bestimmten Höhe in den Boden hinein (Abbildung 10.11). In diesem Zustand existiert dann

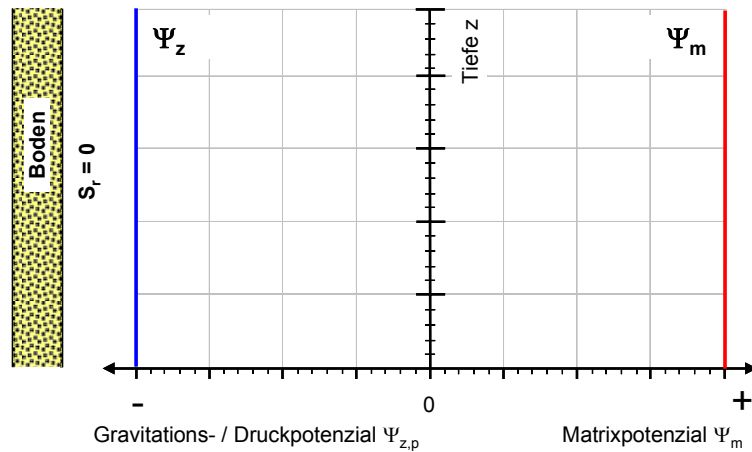


Abbildung 10.10: Zusammenhang zwischen Gravitations- bzw. Druckpotenzial und Matrixpotenzial, Zeitpunkt vor Einstellen der Bodensäule in den Wasserbehälter

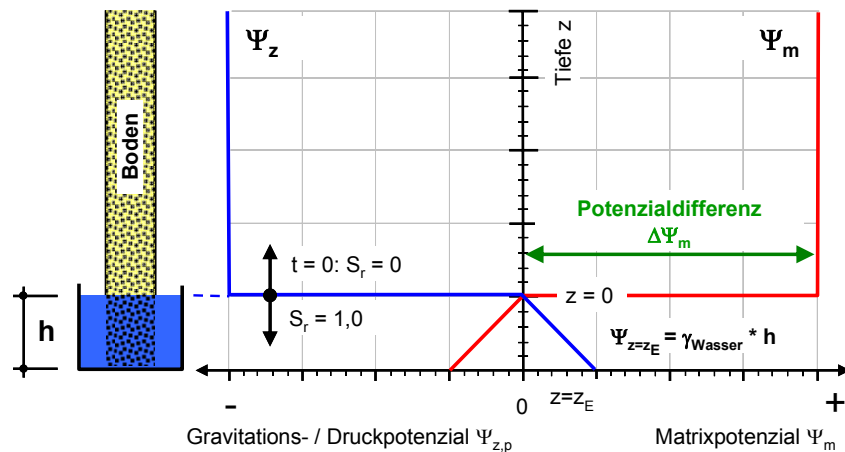


Abbildung 10.11: Zusammenhang zwischen Gravitations- bzw. Druckpotenzial und Matrixpotenzial, Zeitpunkt unmittelbar nach Einstellen eines Wasserspiegels im Boden

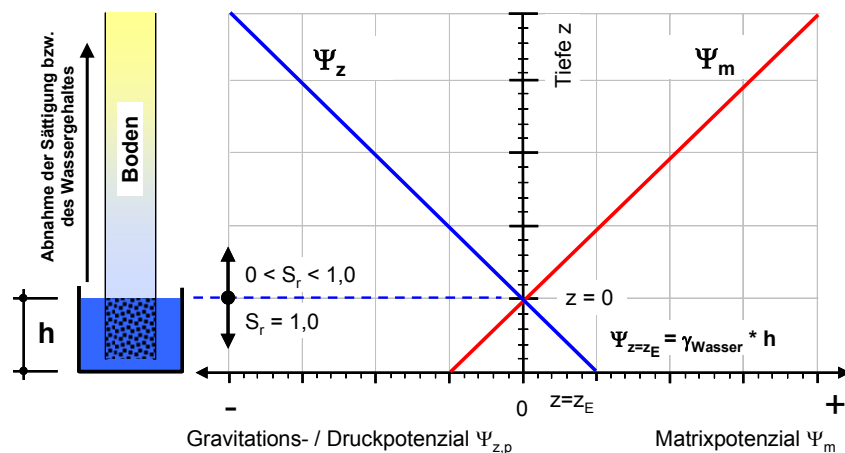


Abbildung 10.12: Zusammenhang zwischen Gravitations- bzw. Druckpotenzial und Matrixpotenzial, Gleichgewichtszustand

ein Wasserspiegel im Boden. Unterhalb dieses Wasserspiegels ist der Boden gesättigt ($S_r = 1,0$), oberhalb liegen zu Beginn des Einstellens ungesättigte Verhältnisse ($S_r = 0$), nach Einstellen eines Gleichgewichtszustandes teilgesättigte Verhältnisse ($0 < S_r < 1,0$) vor. Dabei nimmt der Sättigungsgrad mit zunehmender Höhe oberhalb des Wasserspiegels ab (Abbildung 10.12). Die Ausbildung einer gesättigten Kapillarzone oberhalb des Wasserspiegels wird im Rahmen dieser Betrachtung vernachlässigt.

Diese Teilsättigung resultiert dabei aus dem Matrixpotenzial des Bodens. Zu Beginn des Einstellens des Zylinders ist ein Matrixpotenzial entsprechend der kapillaren und adsorptiven Bindevermögens der Bodenmatrix vorhanden (Abbildung 10.10). Ein positives Gravitationspotenzial existiert noch nicht, da kein Wasser vorhanden ist. Wird der Zylinder in den Wasserbehälter gestellt, stellt sich ab der Wasserspiegellinie ein positives Gravitationspotenzial ein (Abbildung 10.11). Die Differenz zwischen dem Matrixpotenzial im oberen Bereich der Bodensäule und an der Wasserspiegellinie führt zu einem hydraulischen Gradienten, der eine nach oben gerichtete Bewegung des Wassers verursacht. Je höher das Wasser transportiert wird, desto größer ist die dafür zu leistende Arbeit. Die transportierbare Wassermenge nimmt deswegen nach oben hin ab. Das Matrixpotenzial wird entsprechend der zunehmenden Sättigung verkleinert und das Gravitationspotenzial erhöht, bis die Summe aus beiden Potenzialen null ist. Dies ist dann der in Abbildung 10.12 dargestellte Gleichgewichtszustand.

10.3.2 Potenzialentwicklung an einem ausgewählten Adhäsionsversuch

Die Potenzialtheorie kann zur Veranschaulichung und zur Quantifizierung des für den Flüssigkeitstransport aus der Grenzfläche heraus in den Boden hinein und umgekehrt erforderlichen hydraulischen Gradienten verwendet werden. Dies wird an einem in Kap. 9.2.3 beschriebenen Adhäsionsversuch am Versuchston SI-B exemplarisch dargestellt.

Nach dem Einbau des Versuchstons SI-B in den Probenring stellt sich ein Matrixpotential $\Psi_{m,0}$ ein. Dieses beträgt entsprechend der Messung der Saugspannung (siehe Kap. 9.2.2) $\Psi_{m,0} = 34 \text{ kN/m}^2$. Im Rahmen dieser Darstellung wird dieses Matrixpotenzial idealisierend als über die Einbauhöhe konstant angenommen (Abbildung 10.13). Diese Annahme dürfte aufgrund des Einbauprozesses für die untersten beiden Einbaulagen zwar nicht zutreffen, ist aber, wie im Folgenden gezeigt wird, zulässig. Weiterhin wird angenommen, dass sich ein zwischen dem Matrix- und dem Gravitationspotenzial ein Gleichgewichtszustand einstellt, so dass sich über die Einbauhöhe ein konstantes Gravitationspotenzial von $\Psi_{z,0} = -34 \text{ kN/m}^2$ einstellt.

Nun wird die Oberfläche des Versuchstons mit Wasser benetzt. Die Höhe des Wasserstandes beträgt bei einem Volumen der Benetzungsflüssigkeit von 2,5 ml ca. 0,4 mm. Es muss sich dadurch an der Probenoberfläche bzw. im unmittelbar an Probenoberfläche liegenden Bereich der Probe ein positives Gravitationspotenzial entsprechend der Höhe des Wasserstandes einstellen. Das Matrixpotenzial muss dann an der Probenoberfläche einen entsprechenden negativen Wert annehmen. Dieser Zustand ist in Abbildung 10.14 dargestellt. Das Matrixpotenzial im Inneren der Probe bleibt weitgehend unverändert, da weder ausreichend Wasser zur Verfügung steht noch die Benetzungsdauer lang genug ist, um eine Änderung der Potenziale über die gesamte Probenhöhe zu bewirken. Dies wird durch die Messungen des Porenwasserdruckes bestätigt. Eine Änderung des Porenwasserdruckes im Inneren der Probe (Tensiometer 1, 2 und 3) durch die Benetzung ist nicht messbar.

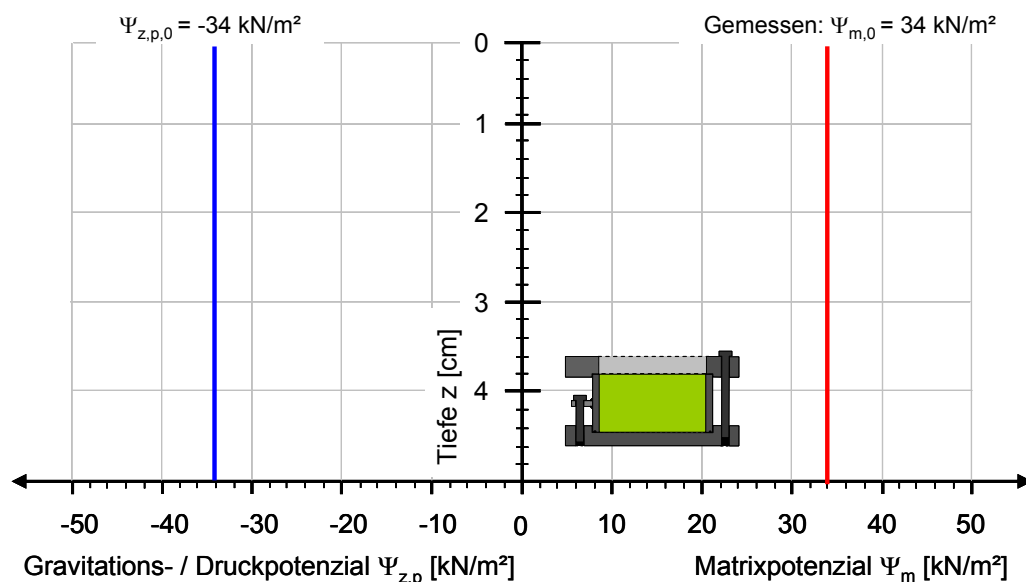


Abbildung 10.13: Potenzial nach dem Einbau

Die Differenz $\partial\Psi$ zwischen dem Matrixpotenzial an der Oberfläche und im Inneren der Probe verursacht einen hydraulischen Gradienten $\partial\Psi/\partial z$, der einen Wassertransport von der Oberfläche in die Bodenmatrix verursacht. Dieser ist nicht konstant, sondern eine Funktion der betrachteten Tiefe z unter der Probenoberfläche und der Dauer der Benetzung.

Infolge des hydraulischen Gradienten kommt es zu einer Strömung Q_B des auf der Probenoberfläche befindlichen Wassers in die Probe hinein.

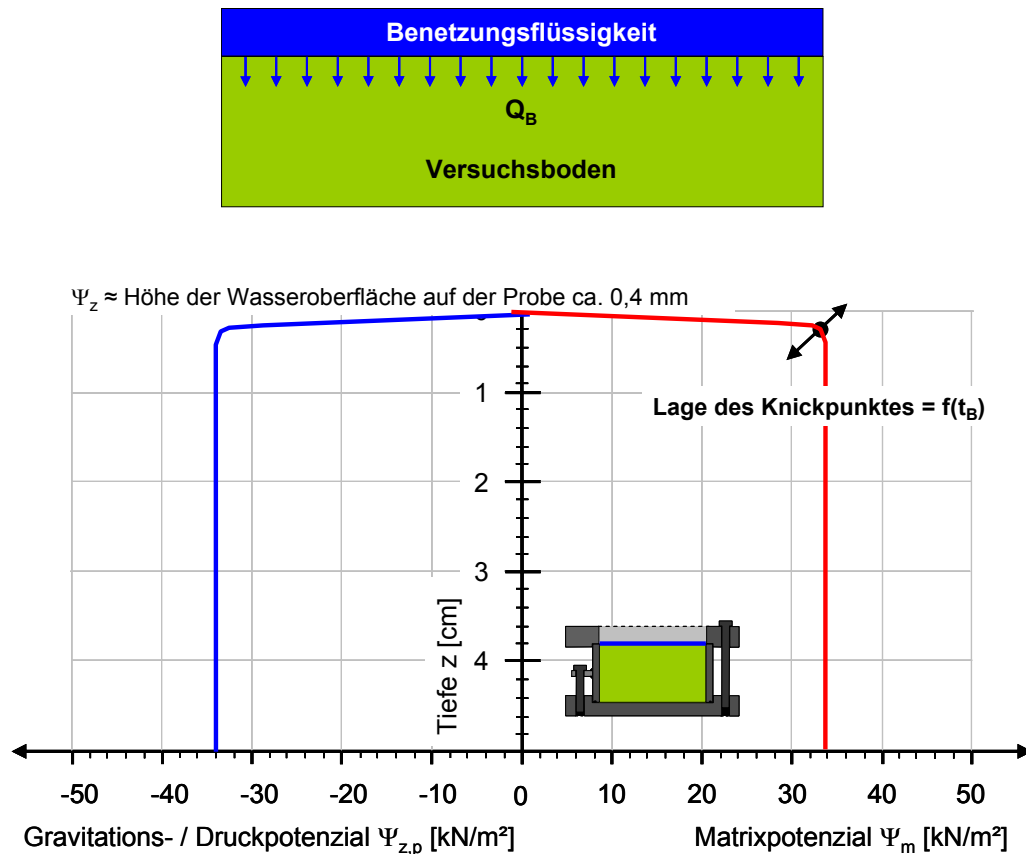


Abbildung 10.14: Potenziale und Strömung Benetzungsphase

In der nun folgenden Andruckphase (Abbildung 10.15) stellt sich in der Flüssigkeit in der Grenzfläche ein Druck entsprechend der Andruckspannung $\sigma_D = 50 \text{ kN/m}^2$ ein. Dadurch entsteht ein entsprechendes Druckpotenzial $\Psi_p = 50 \text{ kN/m}^2$ an der Probenoberfläche. Das Gravitationspotenzial darf hierbei vernachlässigt werden. Das Matrixpotenzial an der Probenoberfläche muss dann einen entsprechenden negativen Wert von $\Psi_m = -50 \text{ kN/m}^2$ annehmen.

Wie die Messungen des Porenwasserdruckes (Kap. 9.2.3) zeigen, wird durch das Andrücken des Adhäsionstestzylinders das Matrixpotenzial im Inneren der Probe verringert. Die Verringerung des Matrixpotenzials $\Delta\Psi_m$ beträgt für den Tensiometer 1 ca. 13 %, für den Tensiometer 2 < 1 % des anfänglichen Matrixpotenzials $\Psi_{m,0}$. Am Tensiometer 3 ist keine Veränderung des Matrixpotenzials zu beobachten. Damit ist die Änderung des Matrixpotenzials für vier Stellen der Probe bekannt, womit dessen Verlauf und damit auch der Verlauf des Gravitations- bzw. Druckpotenzials über die Probehöhe interpoliert werden kann (Abbildung 10.15). Der Nulldurchgang des Matrix- bzw. des Druckpotenzials liegt etwa in 3 mm Tiefe unter der Probenoberfläche. Oberhalb dieses Punktes dürfte der Boden gesättigt, unterhalb teilgesättigt sein.

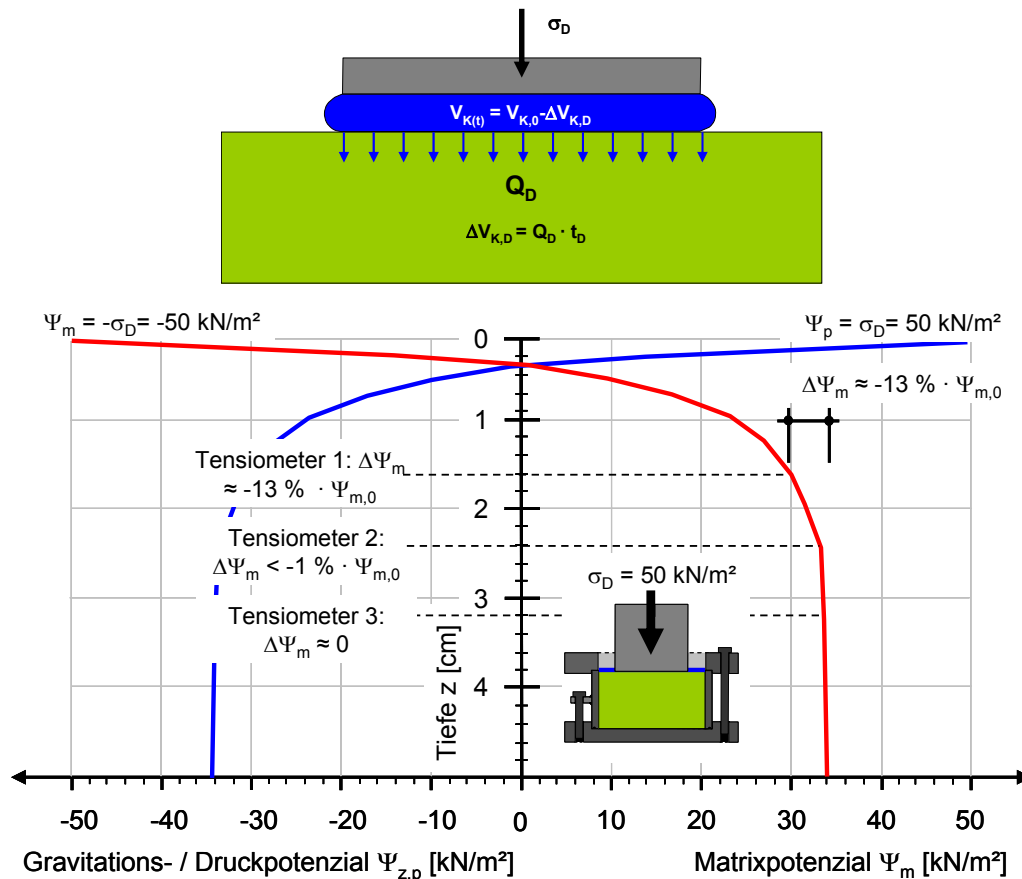


Abbildung 10.15: Potenziale und Strömung Andruckphase

Die Differenz des Matrixpotenzials über die Probenhöhe führt auch hier zur Entwicklung eines hydraulischen Gradienten, der den Wassertransport aus der Grenzfläche heraus in die Bodenmatrix verursacht. Auch dieser ist nicht konstant, sondern eine Funktion der betrachteten Tiefe z unter der Probenoberfläche.

Infolge des hydraulischen Gradienten kommt es zu einer Strömung Q_D des in der Grenzfläche befindlichen Wassers in die Probe hinein. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird um die während der Andruckphase transportierte Flüssigkeitsmenge $\Delta V_{K,D}$ verringert. Diese kann aus dem Volumenstrom Q_D und der Andruckdauer t_D berechnet werden.

Anhand des Kurvenverlaufes ist nun auch die Zulässigkeit der anfänglich getroffenen Annahme hinsichtlich der Idealisierung des Verlaufes des Matrixpotenzials zu erkennen. Die Matrixspannung ändert sich im unteren Probenbereich nicht erkennbar, so dass dort die tatsächliche Größe der Matrixspannung nur von untergeordneter Bedeutung für die Größe des hydraulischen Gradienten ist.

Der Verlauf des Matrix- und des Druckpotenzials in der Eigengewichtsphase ist in Abbildung 10.16 dargestellt. In der Flüssigkeit in der Grenzfläche stellt sich ein Druck entsprechend des

Eigengewichtes des Adhäsionstestzylinders von $\sigma_E = 4,3 \text{ kN/m}^2$ ein. Dadurch entsteht ein entsprechendes Druckpotenzial $\Psi_p = 4,3 \text{ kN/m}^2$ an der Probenoberfläche. Das Gravitationspotenzial wird auch hier wieder vernachlässigt. Das Matrixpotenzial an der Probenoberfläche muss dann einen entsprechenden negativen Wert $\Psi_m = -4,3 \text{ kN/m}^2$ annehmen.

Wie die Messungen des Porenwasserdruckes (Kap. 9.2.3) zeigen, wird durch die Verringerung der Spannung in der Grenzfläche das Matrixpotenzial im Inneren der Probe nun wieder vergrößert. Allerdings bleibt das Matrixpotenzial unter dem anfänglichen Niveau $\Psi_{m,0}$. Die Reduktion des Matrixpotenzials $\Delta\Psi_m$ beträgt für den Tensiometer 1 ca. 7,5 %, für den Tensiometer 2 $< 1 \%$ des anfänglichen Matrixpotenzials $\Psi_{m,0}$. Am Tensiometer 3 ist keine Veränderung des Matrixpotenzials zu beobachten. Damit kann der Verlauf des Matrixpotenzials und damit auch des Gravitations- bzw. Druckpotenzials über die Probenhöhe wieder interpoliert werden kann (Abbildung 10.16). Der Nulldurchgang des Matrix- bzw. des Druckpotenzials liegt etwa in 1 mm Tiefe unter der Probenoberfläche.

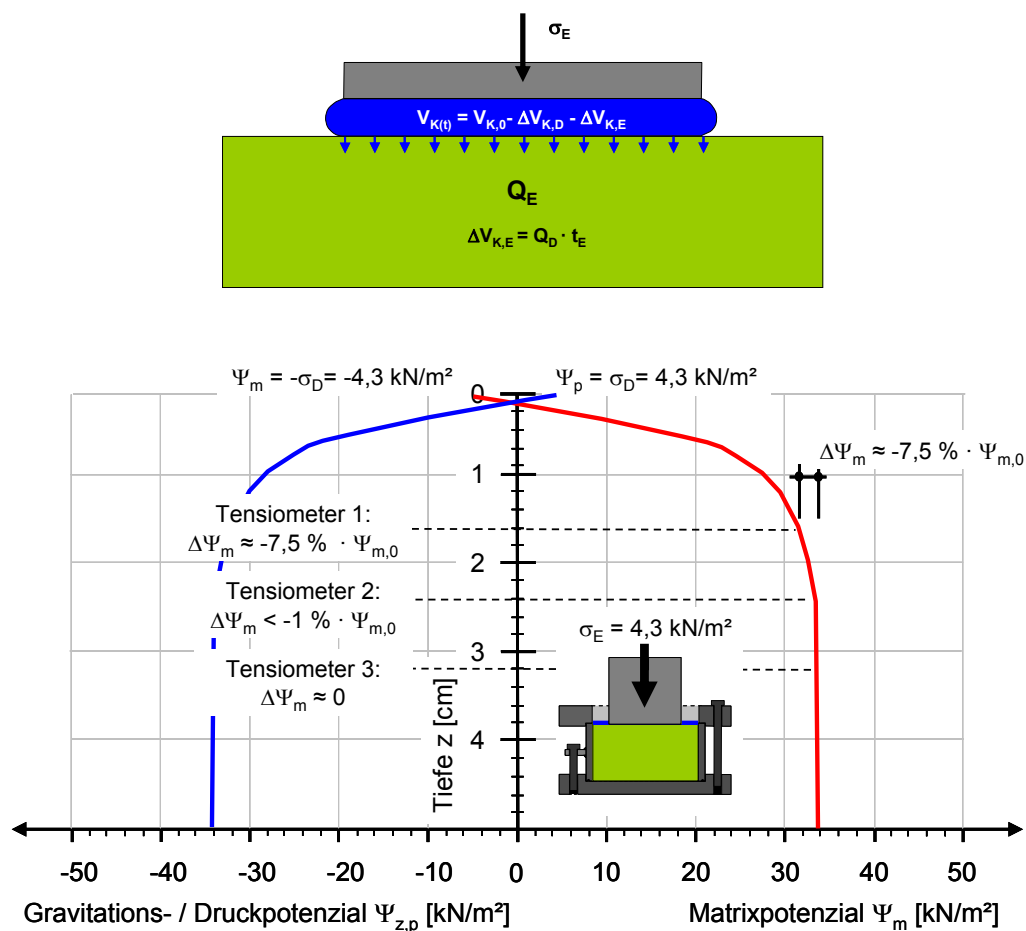


Abbildung 10.16: Potenziale und Strömung Eigengewichtsphase

Der aus der Änderung des Matrixpotenzials über die Probenhöhe resultierende hydraulische Gradient verursacht auch in der Eigengewichtsphase einen Wassertransport aus der Grenzfläche heraus in die Bodenmatrix hinein.

Infolge des hydraulischen Gradienten kommt es zu einer Strömung Q_E des in der Grenzfläche befindlichen Wassers in die Probe hinein. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird um die während der Eigengewichtsphase transportierte Flüssigkeitsmenge $\Delta V_{K,E}$ zusätzlich verringert. Diese kann aus dem Volumenstrom Q_E und der Eigengewichtsdauer t_E berechnet werden.

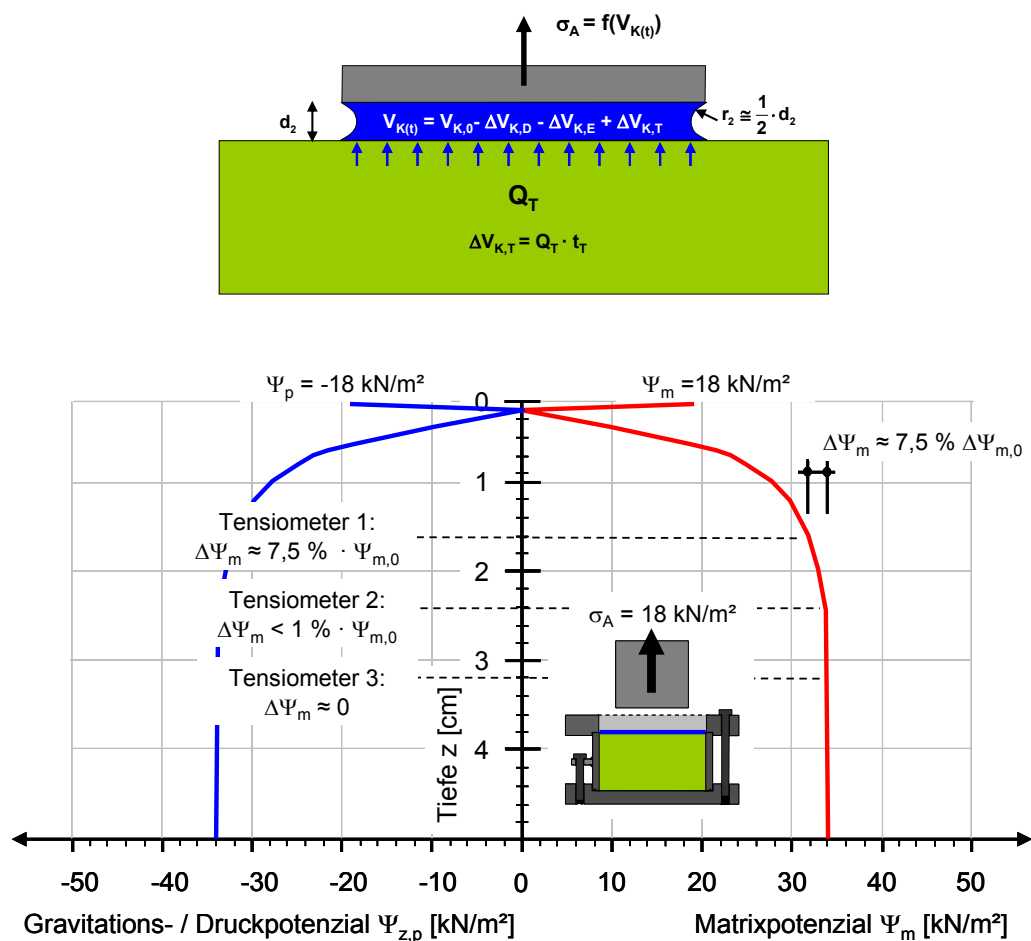


Abbildung 10.17: Potentiale und Strömung Trennphase

In der Trennphase ändern sich die Matrixpotenziale im Inneren der Probe bei Tensiometer 2 und 3 nicht, bei Tensiometer 1 ist die Änderung 1 kaum wahrnehmbar. Es können also gegenüber der Eigengewichtsphase unveränderte Matrixpotenziale angenommen werden. Das Matrixpotenzial an der Probenoberfläche hingegen ändert sich entsprechend der gemessenen Adhäsionsspannung und beträgt für diesen Versuch $\Psi_m = 18 \text{ kN/m}^2$. Aufgrund der kurzen Dauer der Trennphase kann angenommen werden, dass sich kein Gleichgewichtszustand einstellen kann. Die Potenzialkurven zeigen daher einen Wendepunkt. Der Wendepunkt wurde

entsprechend dem Kurvenverlauf der vorangegangenen Eigengewichtsphase angenommen. Im Rahmen dieser Betrachtung wird der Wendepunkt bei $\Psi_m = \Psi_p = 0$ angenommen (Abbildung 10.17). Aus der Potenzialdifferenz zwischen diesem Wendepunkt und der Oberfläche resultiert ein hydraulischer Gradient, der eine nach oben, zur Grenzfläche gerichtete Strömung Q_T erzeugt. Dabei wird Wasser aus der Probe heraus in die Grenzfläche transportiert. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird um die während der Trennphase transportierte Flüssigkeitsmenge $\Delta V_{K,T}$ vergrößert. Diese kann aus dem Volumenstrom Q_E und der Eigengewichtsdauer t_E berechnet werden.

Die Darstellung der Potenziale zeigt, dass die Adhäsion im Wesentlichen durch die Eigenschaften der oberflächennahen Bereiche der Probe, d.h. durch die obersten Millimeter gesteuert wird. In diesem Bereich muss dann auch durch den Wassertransport der Wassergehalt und damit die Konsistenz des Bodens verändert werden.

Einen Hinweis darauf, dass die obersten Millimeter der Probe von großer Bedeutung sind, gibt auch Potyondy [1961], nach dessen Beobachtung unterschiedliche Wassergehalte im Boden festgestellt wurden. An der Grenze zwischen Boden und Stahl wurden ca. 2 % bis 5,5 % höhere Wassergehalte festgestellt als im Durchschnitt der Bodenprobe.

10.4 Adhäsion als Funktion des Wassertransportes

Bei dem vorliegenden System handelt es sich um eine nichtstationäre, eindimensionale Wasserbewegung in senkrechter Richtung im ungesättigten Bereich. Der Wassertransport kann für diesen Fall mathematisch durch die sog. Richards-Gleichung (Gln. 10.2) beschrieben werden [Scheffer & Schachtschnabel, 1998].

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left\{ k \cdot \left[\frac{\partial \Psi_m}{\partial z} + 1 \right] \right\}}{\partial z} \quad (\text{Gln. 10.2})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
θ	: volumetrischer Wassergehalt	Länge ³ / Länge ³	[-] oder [%]
t	: Zeiteinheit	Zeit	[s]
k	: Durchlässigkeitskoeffizient	Länge / Zeit	[m/s]
Ψ_m	: Matrixpotenzial	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
z	: Tiefe unter der Oberfläche	Länge	[m]

Dabei wird eine starre, inerte, homogene und uniforme Bodenmatrix vorausgesetzt. Ebenso wird die Bewegung von Luft in der Bodenmatrix vernachlässigt. Diese Gleichung stellt eine Vereinfachung der allgemeinen, dreidimensionalen Gleichung für den Wassertransport nach Darcy dar. Sind der Durchlässigkeitskoeffizient und die Änderung des Matrixpotenzials konstant, ergibt sich die vereinfachte Form der Darcy-Gleichung. Mit dieser Gleichung wird die Änderung des volumetrischen Wassergehaltes – also die Änderung des Flüssigkeitsvolumens des Bodens in einer Tiefe z für einen Zeitpunkt t in Abhängigkeit des Matrixpotenzials und des Durchlässigkeitskoeffizienten beschrieben. Das Matrixpotenzial und der Durchlässigkeitskoeffizient sind bei dieser Gleichung nicht konstant, sondern ihrerseits eine Funktion der Tiefe z und der Zeitpunktes t . Diese Differentialgleichung wird im Regelfall iterativ mit Hilfe numerischer Verfahren im Rahmen von Modellierung von Wasserbewegungen gelöst.

An dieser Gleichung wird deutlich, dass der Transport von Flüssigkeit in der Andruck- und der Eigengewichtsphase aus der Grenzfläche heraus und in der Trennphase wieder in die Grenzfläche hinein nur durch zwei Parameter gesteuert wird. Zum einen durch das Matrixpotenzial, dessen Änderung $\partial\Psi_m$ über die Probenhöhe den für einen Flüssigkeitstransport erforderlichen hydraulischen Gradienten liefert. Zum anderen wird der Flüssigkeitstransport durch den Durchlässigkeitskoeffizienten des Bodens beeinflusst. Die Änderungen der Flüssigkeitsmenge in der Grenzfläche und damit die Adhäsionsspannungen werden also nur durch die beiden Parameter Matrixpotenzial und Durchlässigkeit gesteuert.

Das Matrixpotenzial ist zum einen abhängig von der mineralogischen Zusammensetzung der Böden. Böden mit einem hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralen zeigen höhere Matrixpotenziale als Böden ohne quellfähige Tonminerale. Daher zeigen quellfähige Tone tendenziell höhere Adhäsionsspannungen als nicht quellfähige Tone. Andererseits ist das Matrixpotenzial abhängig von der Größe der Kapillarröhren und deren Wassersättigung und ist somit ein zustandsabhängiger Parameter.

Der Durchlässigkeitskoeffizient k ist einerseits eine vom Lagerungszustand und dem Wassergehalt des Bodens abhängige Größe. Andererseits hängt der Durchlässigkeitskoeffizient auch von den Eigenschaften des strömenden Fluides ab. Über diesen Parameter nehmen daher auch die Eigenschaften des Fluides Einfluss auf die Adhäsionsspannungen.

10.5 Rechnerische Abschätzung der Adhäsionsspannungen

Für die in Kap. 9 beschriebenen Versuche mit Messung des Porenwasserdruckes an den Versuchstonen SI-B und ISK-E werden die Adhäsionsspannungen rechnerisch aus den Porenwasserdrücken, bzw. den daraus abgeschätzten hydraulischen Gradienten und der

gemessenen Permeabilität (Kap. 7.4) abgeleitet und mit den in den jeweiligen Versuchen gemessenen Adhäsionsspannungen verglichen. Dazu wird die Änderung des Anfangskapillarovolumens $V_{K,0}$ für jede Versuchsphase und daraus das Volumen der Kapillarflüssigkeit am Ende der Trennphase berechnet. Die Benetzungsphase wird dabei vernachlässigt, da diese für die Änderung des Kapillarovolumens nur mittelbar einen Einfluss über die Änderung des Sättigungsgrades der oberen Millimeter der Probe hat (Kap. 11.5).

Für den Versuch an dem Versuchston KI-S ist eine rechnerische Abschätzung nicht möglich, da hier der Einfluss der Konsolidation bzw. der Verformung nicht mehr vernachlässigt werden darf und daher die näherungsweise Voraussetzung einer starren Bodenmatrix nicht mehr zutrifft.

10.5.1 Vereinfachungen und Annahmen

Zur Abschätzung der Adhäsionsspannungen aus dem Flüssigkeitstransport wird idealisierend die einfachste Form der Gleichung nach Darcy verwendet (Gln. 10.3).

$$\frac{dV}{dt} = Q = k \cdot \frac{d\psi_m}{dl} \cdot A \quad (\text{Gln. 10.3})$$

Nach Integration über einen betrachteten Zeitabschnitt und eine bestimmte Länge nimmt die Gleichung die Form nach Gln. 10.4 an.

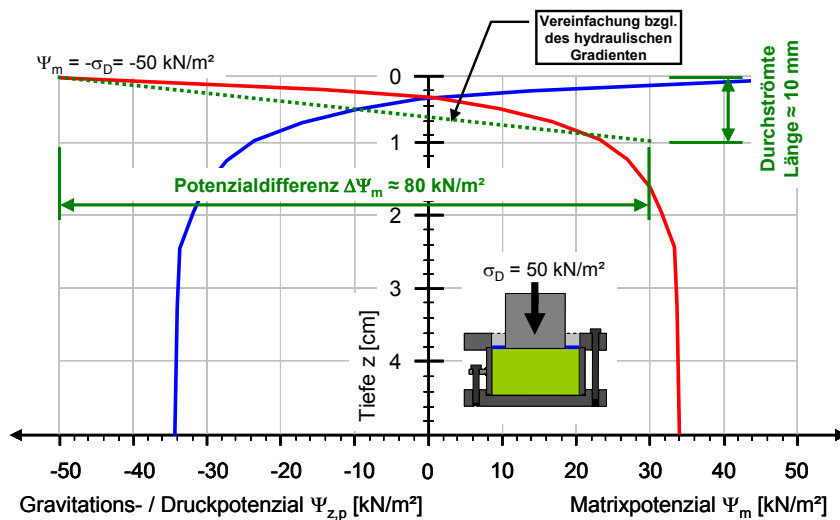
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q = k \cdot \frac{\Delta\psi_m}{\Delta l} \cdot A \quad (\text{Gln. 10.4})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
V	: Volumen des Wassers	Länge ³	[m ³]
t	: Zeiteinheit	Zeit	[s]
Q	: Volumenstrom	Länge ³ / Zeit	[m ³ /s]
k	: Durchlässigkeitskoeffizient	Länge / Zeit	[m/s]
Ψ_m	: Matrixpotenzial	Kraft / Länge ²	[kN/m ²] oder [mWs]
$\Delta\Psi_m$: Potenzialdifferenz	Kraft / Länge ²	[kN/m ²] oder [mWs]
Δl	: Durchströmte Länge	Länge	[m]
A	: Durchströmte Fläche	Länge ²	[m ²]

Dabei werden die Änderung des Matrixpotenzials und des Durchlässigkeitskoeffizienten als konstant angesehen, bzw. deren räumliche und zeitliche Änderung nicht berücksichtigt. Diese

Vereinfachungen sind für den Versuch am Versuchston SI-B (Kap. 9.2.3) in Abbildung 10.18 dargestellt.

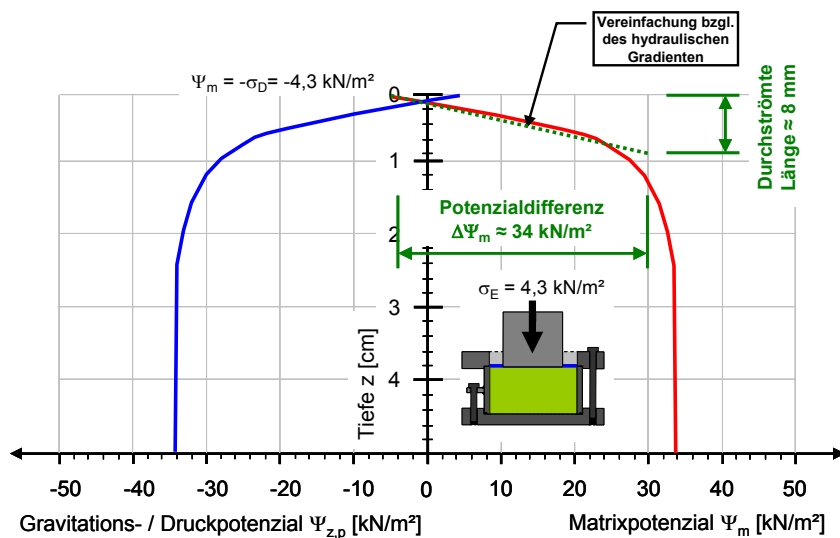


Andruckphase

Vereinfachend wird ein konstanter hydraulischer Gradient aus der Potenzialdifferenz

$$\Delta\Psi_m \approx 30 - (-50) = 80 \text{ kN/m}^2$$

(entspr. 8,0 m Wassersäule) und der durchströmten Länge des Bodens von $\Delta l \approx 10 \text{ mm}$ (aus dem Kurvenverlauf abgeleitet) angenommen.

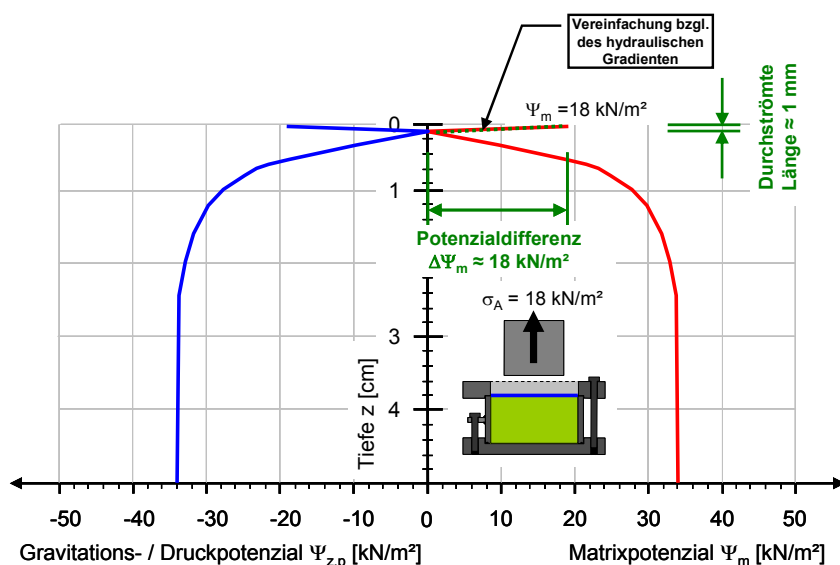


Eigengewichtsphase

Vereinfachend wird ein konstanter hydraulischer Gradient aus der Potenzialdifferenz

$$\Delta\Psi_m \approx 30 - (-4,3) = 34,3 \text{ kN/m}^2$$

(entspr. 3,4 m Wassersäule) und der durchströmten Länge des Bodens von $\Delta l \approx 8 \text{ mm}$ (aus dem Kurvenverlauf abgeleitet) angenommen.



Trennphase

Vereinfachend wird ein konstanter hydraulischer Gradient aus der Potenzialdifferenz

$$\Delta\Psi_m \approx 18 - 0 = 18 \text{ kN/m}^2$$

(entspr. 1,8 m Wassersäule) und der durchströmten Länge des Bodens von $\Delta l \approx 1 \text{ mm}$ (aus dem Kurvenverlauf abgeleitet) angenommen.

Abbildung 10.18: Vereinfachung des hydraulischen Gradienten, Versuchston SI-B

Weiterhin wird das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ entsprechend den Versuchen zur Messung der Adhäsion zwischen Stahloberflächen (Kap. 3.2) mit $V_{K,0} = 0,09 \text{ ml}$ (entspricht $V_{K,0} = 9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$) angenommen. Als durchströmte Fläche wird die Querschnittsfläche des Adhäsionstestzylinders angenommen. Die horizontale Ausbreitung der Wasserströmung wird wegen der geringen Wassermenge vernachlässigt. Die durchströmte Länge l wird entsprechend den Annahmen zum jeweiligen hydraulischen Gradienten angenommen (Abbildung 10.18).

Die Permeabilität K (Kap. 7.4) wird mit der Gln. 10.5 in den Durchlässigkeitskoeffizienten k umgerechnet [Scheffer & Schachtschnabel, 1998].

$$k = K \cdot \frac{\rho_{\text{Fl}} \cdot g}{\eta} \quad (\text{Gln. 10.5})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
k	: Durchlässigkeitskoeffizient	Länge / Zeit	[m/s]
K	: Permeabilität	Länge	[m ²]
ρ_{Fl}	: Dichte des Fluides	Masse / Länge ³	[kg/m ³]
g	: Erdbeschleunigung	Länge / Zeit ²	[m/s ²]
η	: Dynamische Viskosität des Fluides	Druck·Zeit	[Pa·s]

Für die Berechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten wird eine Dichte des Wassers von $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, eine Erdbeschleunigung von $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ und einer dynamischen Viskosität $\eta = 1,01 \cdot 10^{-3} \text{ Pa·s}$ (für 20° C) angesetzt. In der Andruck- und der Eigengewichtsphase wird der Durchlässigkeitskoeffizient über den gesamten durchströmten Bereich als konstant angenommen. Er gilt für teilgesättigte Verhältnisse, da die Benetzungswassermenge nicht ausreicht um den durchströmten Bereich zu sättigen. Für die Trennphase wird jedoch angenommen, dass der durchströmte Bereich, dessen Länge nur ca. 1 mm beträgt, vollständig wassergesättigt ist. Dies ergibt sich aus dem Nulldurchgang der Potenziale. Der Durchlässigkeitskoeffizient (für Wasser) ist bei vollständiger Wassersättigung immer größer als in teilgesättigten Verhältnissen [Schick, 2003]. Im Rahmen dieser Abschätzung wird der Durchlässigkeitskoeffizient für den durchströmten Bereich in der Trennphase um den Faktor 2 erhöht. Dieser Faktor wurde aus dem Verhältnis der von Wyckoff & Botset [1936] (zitiert in Schick, [2003]) ermittelten relativen Durchlässigkeiten von Böden für $S_r \approx 80 \%$ (Kap. 7.4) und 100 % abgeleitet.

10.5.2 Abschätzung für Versuchston SI-B

Die Abschätzung wird zunächst für den in Kap. 9.2.3 und Kap. 10.3.2 beschriebenen Adhäsionsversuch am Versuchston SI-B vorgenommen.

Die Änderungen der Matrixpotenziale, die jeweiligen durchströmten Bereiche der Proben und die Dauer der Phasen sind in Kap. 9.2.3 und in Kap. 10.3.2 beschrieben und in Tabelle 10.1 zusammengestellt.

Tabelle 10.1 Matrixpotenzialänderungen, durchströmte Längen und Dauer in den Versuchsphasen, Versuchston SI-B

Versuchsphase	Änderung des Matrixpotenzials $\Delta\Psi_m$		Durchströmte Länge l		Dauer t	Durchlässigkeitskoeffizient k
	[kN/m ²]	[mWs]	[mm]	[m]		
Andruckphase	80	8,0	10	0,01	100	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Eigengewichtsphase	34	3,4	8	0,008	40	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Trennphase	18	1,8	1	0,001	5	$3,8 \cdot 10^{-10}$

Der Durchlässigkeitskoeffizient für die Andruck- und die Eigengewichtsphase wird entsprechend der Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen gewählt. Für die Konsistenz $I_C = 0,95$ wurde eine Permeabilität von $K = 0,19 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ gemessen. Daraus ergibt sich nach Gln. 10.5 ein Durchlässigkeitskoeffizient von $k = 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ für die Andruck- und die Eigengewichtsphase und Durchlässigkeitskoeffizient von $k = 3,8 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ für die Trennphase.

Mit den genannten Annahmen kann nun die Veränderung des Anfangskapillarovolumens $V_{K,0}$ für jede Versuchsphase berechnet werden (Gln. 10.6 bis Gln. 10.8).

Andruckphase:

$$\Delta V_{K,D} = 1,9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{8,0}{0,01} \cdot \pi \cdot 0,031^2 \cdot 100 = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \quad (\text{Gln. 10.6})$$

Eigengewichtsphase:

$$\Delta V_{K,E} = 1,9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{3,4}{0,008} \cdot \pi \cdot 0,031^2 \cdot 40 = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \quad (\text{Gln. 10.7})$$

Trennphase:

$$\Delta V_{K,T} = 3,8 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1,8}{0,001} \cdot \pi \cdot 0,031^2 \cdot 5 = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \quad (\text{Gln. 10.8})$$

Das Kapillarvolumen am Ende der Trennphase V_K kann damit bestimmt werden (Gln. 10.9).

$$\begin{aligned} V_K &= V_{K,0} - \Delta V_{K,D} - \Delta V_{K,E} + \Delta V_{K,T} \\ &= (9,0 - 4,6 - 1,0 + 1,0) \cdot 10^{-8} = 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (\text{Gln. 10.9})$$

Mit diesem Volumen der Kapillarvolumen kann nun die Dicke des Flüssigkeitsfilmes d_2 nach Gln. 10.10 und damit der Radius r_2 des Meniskus entsprechend Gln. 3.4 (Kap. 3.3) berechnet werden (Gln. 10.11).

$$d_2 = \frac{V_K}{A} = \frac{4,4 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 0,031^2} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad (\text{Gln. 10.10})$$

$$r_2 \approx \frac{d_2}{2} = \frac{1,46 \cdot 10^{-5}}{2} = 7,29 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (\text{Gln. 10.11})$$

Mit der Gleichung 3.12 (Kap. 3.3) ergibt sich hierfür die Adhäsionsspannung nach Gln. 10.12.

$$\sigma_A = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = 7,28 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{1}{0,031} + \frac{1}{7,29 \cdot 10^{-6}} \right) \approx 10 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Gln. 10.12})$$

Die für diesen Versuch gemessene Adhäsionsspannung betrug $\sigma_A = 18 \text{ kN/m}^2$. Die Übereinstimmung der berechneten mit der gemessenen Adhäsionsspannung ist unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen als gut zu bezeichnen (Kap. 10.5.4).

10.5.3 Abschätzung für Versuchston ISK-E

In gleicher Weise kann für den in Kap. 9.2.4 beschriebenen Adhäsionsversuch am Versuchston ISK-E die Adhäsionsspannung berechnet werden. Die Berechnungsgrundlagen hierfür sind in Tabelle 10.2 zusammengestellt.

Für die Berechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten wird die gemessene Permeabilität (Kap. 7.4) von $K = 0,074 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ angenommen. Daraus ergibt sich nach Gln. 10.5 ein Durchlässigkeitskoeffizient von $k = 7,4 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ für die Andruck- und die Eigengewichtsphase und Durchlässigkeitskoeffizient von $k = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ für die Trennphase.

Mit diesen Grundlagen kann nun die Veränderung des Anfangskapillarvolumens für jede Versuchsphase berechnet werden (Gln. 10.13 bis Gln. 10.15).

Tabelle 10.2 Matrixpotenzialänderungen, durchströmte Längen, Dauer und Durchlässigkeitskoeffizient in den Versuchsphasen, Versuchston ISK-E

Versuchsphase	Änderung des Matrixpotenzials $\Delta\Psi_m$		Durchströmte Länge l		Dauer t	Durchlässigkeitskoeffizient k
	[kN/m ²]	[mWs]	[mm]	[m]		
Andruckphase	88	8,8	10	0,01	110	$7,4 \cdot 10^{-11}$
Eigengewichtsphase	43	4,3	8	0,008	40	$7,4 \cdot 10^{-11}$
Trennphase	6,5	0,65	1	0,001	5	$1,5 \cdot 10^{-10}$

Andruckphase:

$$\Delta V_{K,D} = 7,4 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{8,8}{0,01} \cdot \pi \cdot 0,031^2 \cdot 110 = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \quad (\text{Gln. 10.13})$$

Eigengewichtsphase:

$$\Delta V_{K,E} = 7,4 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{4,3}{0,008} \cdot \pi \cdot 0,031^2 \cdot 40 = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \quad (\text{Gln. 10.14})$$

Trennphase:

$$\Delta V_{K,T} = 1,5 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{0,65}{0,001} \cdot \pi \cdot 0,031^2 \cdot 5 = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \quad (\text{Gln. 10.15})$$

Das Kapillarvolumen am Ende der Trennphase V_K kann damit bestimmt werden (Gln. 10.16).

$$\begin{aligned} V_K &= V_{K,0} - \Delta V_{K,D} - \Delta V_{K,E} + \Delta V_{K,T} \\ &= (9,0 - 2,2 - 0,5 + 0,2) \cdot 10^{-8} = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (\text{Gln. 10.16})$$

Mit diesem Volumen der Kapillarvolumen kann wiederum die Dicke des Flüssigkeitsfilmes d_2 nach Gln. 10.17 und damit der Radius r_2 des Meniskus entsprechend berechnet werden (Gln. 10.18).

$$d_2 = \frac{V_K}{A} = \frac{6,5 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 0,031^2} = 2,15 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad (\text{Gln. 10.17})$$

$$r_2 = \frac{d_2}{2} = \frac{2,15 \cdot 10^{-5}}{2} = 1,08 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad (\text{Gln. 10.18})$$

Hierfür ergibt sich die Adhäsionsspannung nach Gln. 10.19.

$$\sigma_A = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = 7,28 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{1}{0,031} + \frac{1}{1,08 \cdot 10^{-5}} \right) \approx 6,8 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Gln. 10.19})$$

Die für diesen Versuch berechnete Adhäsionsspannung stimmt mit der gemessenen Adhäsionsspannung von $\sigma_A = 6,5 \text{ kN/m}^2$ sehr gut überein (Kap. 10.5.4).

10.5.4 Bewertung der rechnerischen Abschätzung der Adhäsionsspannungen

Für die beiden Versuche ergibt sich eine gute Übereinstimmung der theoretisch abgeleiteten Adhäsionsspannungen mit den jeweils in den Versuchen gemessenen Adhäsionsspannungen (Tabelle 10.3).

Tabelle 10.3 Vergleich der berechneten und der gemessenen Adhäsionsspannungen

Versuchston	Adhäsionsspannung σ_A [kN/m ²]	
	Berechnet	Gemessen
SI-B	10	18
ISK-E	6,8	6,5

Diese erstaunlich gute Übereinstimmung wird unter Würdigung der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen hinsichtlich der mathematischen Beschreibung der Strömung, des hydraulischen Gradienten, der Annahme des Anfangskapillarovolumens, der Vernachlässigung der Benetzungsphase und insbesondere der Unsicherheiten in der Bestimmung der Permeabilität als zufällig angesehen.

Entscheidend ist hierbei auch nicht das Maß der Übereinstimmung, sondern vielmehr der Umstand, dass die berechneten Adhäsionsspannungen in der gleichen Größenordnung liegen wie die gemessenen. Das bodenphysikalische Modell wird daher als experimentell bestätigt angesehen.

11 Diskussion des Adhäsionsmodells

Mit dem in Kap. 10 vorgestellten Adhäsionsmodell können die Ergebnisse sowohl der eigenen Adhäsionsversuche als auch die anderer Autoren qualitativ anschaulich erklärt werden. Im Folgenden wird die Abhängigkeit der Adhäsion von verschiedenen Einflüssen mit Hilfe des Adhäsionsmodells dargestellt. Dabei wird für die qualitative Darstellung die Vereinfachung der Darcy-Gleichung entsprechend Kap. 10.5 verwendet.

11.1 Abhängigkeit von der Matrixspannung und der Permeabilität

Der Wassertransport während des Versuches wird direkt durch zwei Einflussgrößen bestimmt, die Matrixspannung und die Durchlässigkeit des Bodens. Beides sind Zustandsgrößen, die während eines Versuches nicht konstant sind.

Das Matrixpotenzial ist eine Größe, die zum Einen durch den volumetrischen Wassergehalt und zum Anderen durch die Porengrößenverteilung bestimmt ist. Die Porengrößenverteilung wird durch die Korngrößen und den Verdichtungsgrad gesteuert. Weiterhin steuert die mineralogische Zusammensetzung eines Bodens dessen Matrixpotenzial, da diese auch dessen Wasserbindevermögen regeln. Über das Matrixpotenzial wird der Einfluss dieser Eigenschaften eines Bodens ausgedrückt.

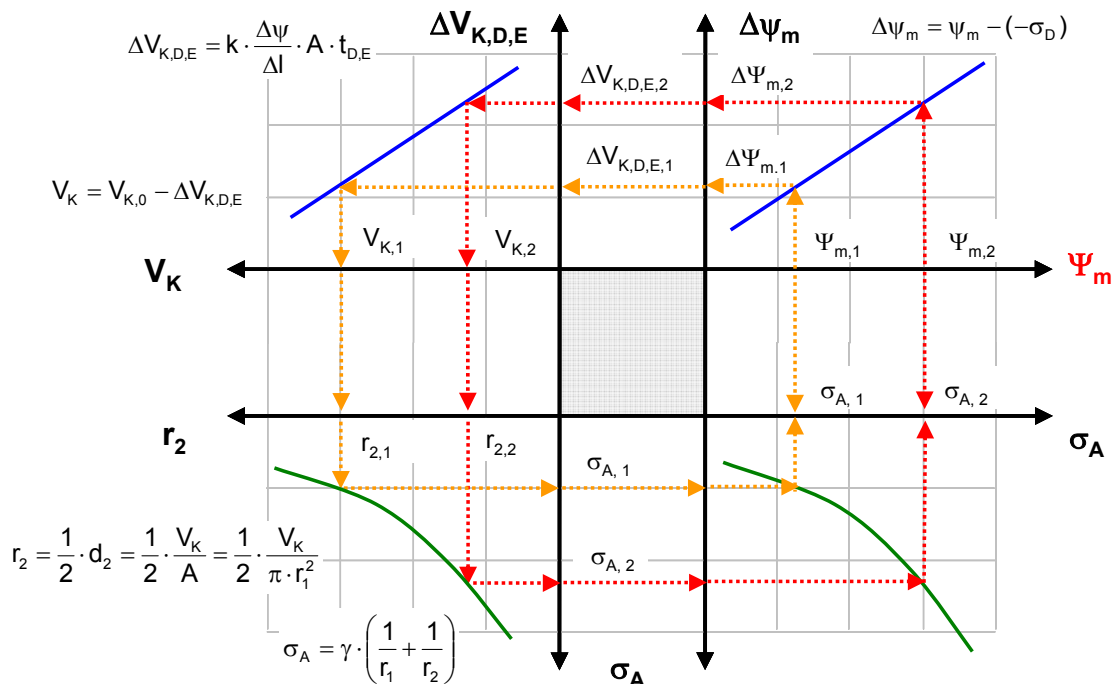


Abbildung 11.1: Abhängigkeit der Adhäsion vom Matrixpotenzial

Die Abhängigkeit der Adhäsionsspannung zeigt Abbildung 11.1 . Es werden zwei unterschiedlich große Matrixpotenziale $\Psi_{m,1} < \Psi_{m,2}$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Das größere Matrixpotenzial liefert eine größere Potenzialdifferenz $\Delta\Psi_{m,2}$ und damit einen größeren hydraulischen Gradienten. Dadurch ist der Volumenstrom bzw. das Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E,2}$) heraustransportiert wird, größer. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in höherem Maße verringert als beim kleineren Matrixpotenzial Ψ_1 . Das Kapillarovolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher beim größeren Matrixpotenzial kleiner sein. Dadurch treten größere Adhäsionsspannungen auf.

Dies ist der Grund, warum quellfähige Tone, die im Regelfall ein größeres Wasserbindevermögen und damit ein größeres Matrixpotenzial als nicht quellfähige Tone aufweisen, tendenziell auch größere Adhäsionsspannungen zeigen. Entsprechende Beobachtungen bzgl. der Adhäsionseigenschaften quellfähiger Tone werden auch von Thewes [1999] beschrieben.

Der Einfluss der Durchlässigkeit als die zweite, wesentlich die Adhäsion bestimmenden Größe ist in Abbildung 11.2 dargestellt.

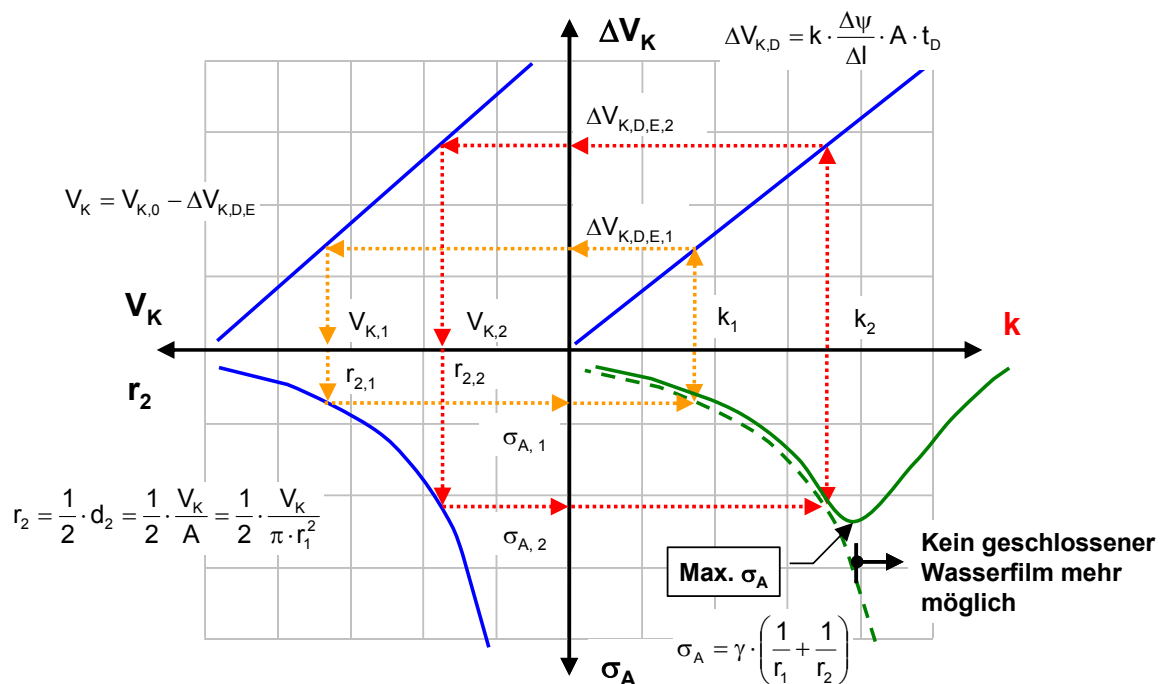


Abbildung 11.2: Abhängigkeit der Adhäsion von der Durchlässigkeit

Es werden zwei unterschiedlich große Durchlässigkeitskoeffizienten $k_1 < k_2$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Der größere Durchlässigkeitskoeffizient k_2 liefert einen größeren Volumenstrom bzw. ein größeres Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E,2}$) heraustransportiert wird. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in höherem Maße verringert als bei dem kleineren Durchlässigkeitskoeffizienten k_1 . Das Kapillarovolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher beim größeren Matrixpotenzial kleiner sein. Dadurch treten größere Adhäsionsspannungen auf.

Bei vergleichsweise dichten Tonen kann also trotz eines hohen Matrixpotenzials in den hier betrachteten Zeiten nicht genügend Wasser aus der Grenzfläche heraustransportiert werden, um hohe Adhäsionskräfte aufzubauen. Die Adhäsionsspannungen bleiben in dem Fall klein. So zeigen die Versuchstone KI-S und ISK-E vergleichsweise geringere Durchlässigkeiten (Kap. 8.5.4) und dementsprechend auch geringere Adhäsionsspannungen als die Versuchstone KI-W und SI-B .

Es muss dabei eine Durchlässigkeit geben, bei der die Adhäsionsspannungen ein Maximum annehmen. Bei höherer Durchlässigkeit müssen die Adhäsionsspannungen dann niedriger werden, da viel Wasser aus dem Porenraum heraustransportiert wird, bzw. sich kein Kapillarfilm mehr ausbilden kann.

11.2 Abhängigkeit von der Plastizität

Die Plastizität ist ein Maß für das Wasserbindevermögen eines Bodens. Ausgeprägt plastische Tone können aufgrund ihrer vergleichsweise höheren spezifischen Oberfläche, der Geometrie ihrer Kapillaren und ihrer mineralogischen Eigenschaften eine größere Menge Wasser binden. Ausgeprägt plastische Tone enthalten auch meist quellfähige Tonminerale. Daher ist ihr Matrixpotenzial in der Regel auch größer als das eines geringer plastischen Tons bei gleichem volumetrischen Wassergehalt. Der Einfluss des Matrixpotenzials wurde bereits dargestellt. Daher werden bei zunehmender Plastizität eines Bodens i.d.R. häufig auch größere Adhäsionsspannungen beobachtet [Thewes, 1999, Schlick, 1989].

Der Grund, warum bei dem ausgeprägt plastischen Versuchston ISK-E geringere Adhäsionsspannungen gemessen wurden als beim mittelplastischen Versuchston KI-W ist in der Überlagerung mit dem Einfluss der Durchlässigkeit begründet. Die Permeabilität des Versuchstons ISK-E ist wesentlich geringer als die des Versuchstons KI-W.

11.3 Abhängigkeit von der Konsistenz

Die Konsistenz - quantifiziert durch die Konsistenzzahl I_C - eines Bodens ist eine vom Wassergehalt w und den Zustandsgrenzen (Wassergehalte an der Fließgrenze w_L und an der Ausrollgrenze w_P) abhängige Größe. Die Abhängigkeit der Adhäsion von der Konsistenz eines Tonbodens ist in Abbildung 11.3 veranschaulicht.

Es werden zwei unterschiedliche Konsistenzzahlen $I_{C,1} < I_{C,2}$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Die größere Konsistenzzahl $I_{C,2}$ hat einen geringeren Wassergehalt und damit ein größeres Matrixpotenzial. Das größere Matrixpotenzial liefert eine größere Potenzialdifferenz $\Delta\Psi_{m,2}$ und damit einen größeren hydraulischen Gradienten. Dadurch ist der Volumenstrom bzw. das Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E,2}$) heraustransportiert wird, größer. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in höherem Maße verringert als bei dem zur kleineren Konsistenzzahl $I_{C,1}$ gehörenden kleineren Matrixpotenzial Ψ_1 . Das Kapillarovolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher bei der größeren Konsistenzzahl kleiner sein. Dadurch treten bei größeren Konsistenzzahlen größere Adhäsionsspannungen auf.

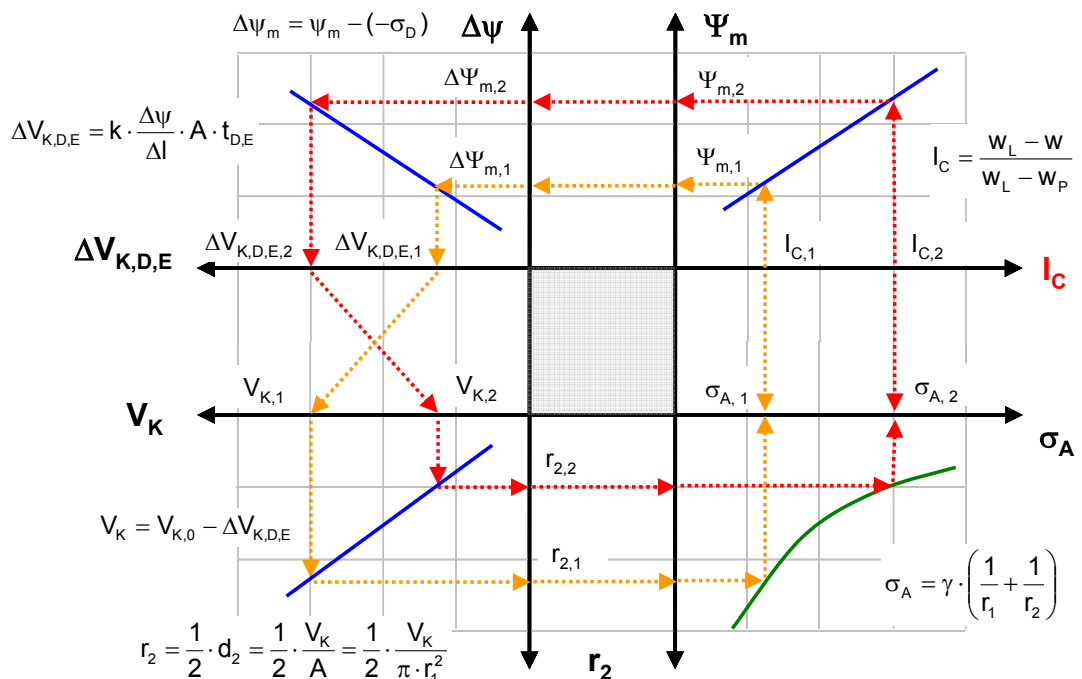


Abbildung 11.3: Abhängigkeit der Adhäsion von der Konsistenz (mit Benetzung der Probenoberfläche)

Dieses Verhalten wird bei allen Versuchstonen beobachtet (Kap. 8.4.1, Abbildung 8.2). Auch Thewes [1999] stellt ein Ansteigen der Adhäsionsspannungen mit größerer Konsistenzzahl fest.

Andere Autoren [Beretitsch, 1992], [Schlick, 1989], [Wilms; 1995], [Jancsecz, 1991] stellen allerdings ein Maximum der Adhäsion für eine bestimmte Konsistenzzahl bzw. eine Abnahme der Adhäsion mit zunehmender Konsistenzzahl fest. Bei diesen Versuchen wird die Oberfläche der Versuchsböden allerdings nicht gezielt benetzt. Das für den Kapillarfilm notwendige Wasser muss aus den Böden selber durch Auspressen des Porenwassers zur Verfügung gestellt werden. Das Adhäsionsverhalten kann unter diesen Verhältnissen wie folgt erklärt werden: Bei einer bestimmten (vergleichsweise niedrigen) Konsistenzzahl wird eine bestimmte Menge Wasser in die Grenzfläche hineintransportiert. Bei steigender Konsistenzzahl (also kleinerem Wassergehalt) nimmt die Menge des transportierbaren Wassers aber ab, da es zunehmend schwerer wird, Wasser aus dem Boden in die Grenzfläche zu transportieren. Sinkt die Menge des in die Grenzfläche transportierten Wassers, nimmt auch die Dicke bzw. der Radius des Meniskus der Kapillarflüssigkeit ab. Damit steigen die Adhäsionsspannungen. Ab einer bestimmten Konsistenzzahl kann aber nun nicht mehr genügend Wasser aus dem Boden in die Grenzfläche hineintransportiert werden, so dass sich kein geschlossener Kapillarfilm mehr ausbilden kann. Die Adhäsionsspannungen nehmen wieder kleinere Werte an. Einen entsprechenden Zusammenhang zeigt auch Schubert [1972]. Der Wassergehalt, ab dem nicht mehr genügend Wasser aus dem Boden heraustransportiert werden kann, scheint nach den Versuchen von Schlick [1989] und Beretitsch [1992] etwa bei der Ausrollgrenze w_p bzw. bei einer Konsistenzzahl von $I_c = 1,0$ zu liegen.

11.4 Abhängigkeit von der Andruckspannung

Die Andruckspannung liefert zusammen mit dem Matrixpotenzial die Potenzialdifferenz und bestimmt damit einen Teil des hydraulischen Gradienten. Steigt die Andruckspannung, steigen auch die Adhäsionsspannungen, da infolge des größeren hydraulischen Gradienten auch die aus der Grenzfläche heraustransportierte Wassermenge steigt. Der Volumenstrom bzw. das Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E}$) heraustransportiert wird, ist größer. Das Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in höherem Maße verringert. Das Kapillarvolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher bei der größeren Konsistenzzahl kleiner sein. Dadurch treten bei größeren Andruckspannungen auch größere Adhäsionsspannungen auf. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 11.4 für zwei Andruckspannungen $\sigma_{D,1} < \sigma_{D,2}$ dargestellt.

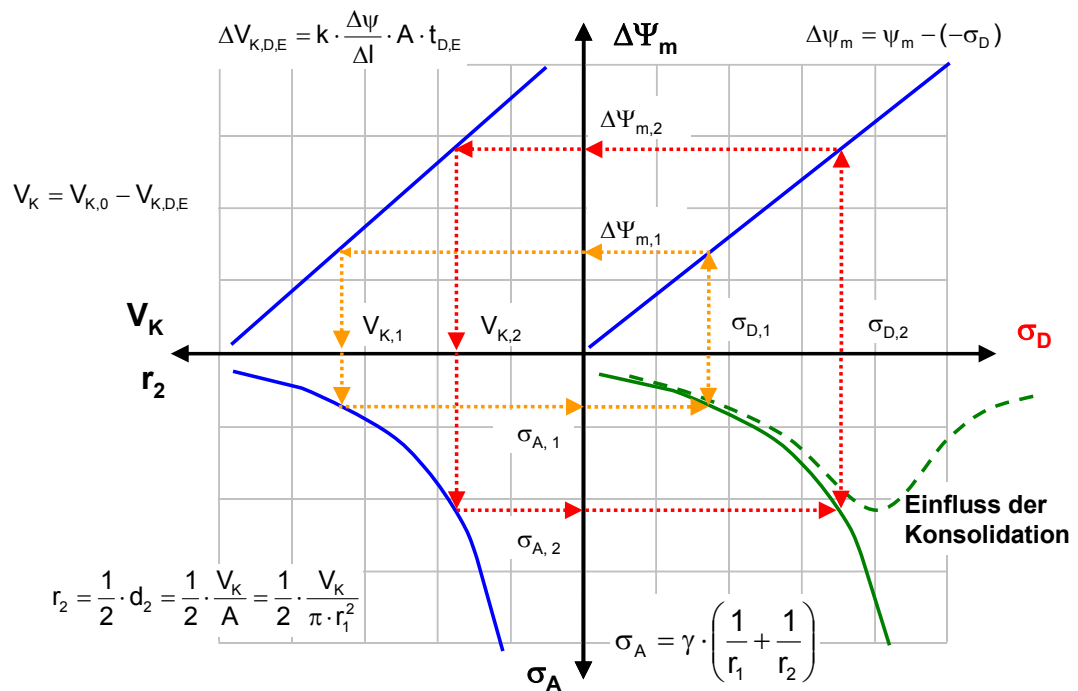


Abbildung 11.4: Abhängigkeit der Adhäsion von der Andruckspannung

Dieser Zusammenhang ist auch in den Versuchen beobachtet worden (Kap. 8.4.2). Den Anstieg der Adhäsionsspannung mit Steigerung der Andruckspannung wurde u.a. auch von Potyondy [1961], Riek [1963], Schlick [1989], Beretitsch [1992] und Thewes [1999] gefunden. Hierzu ist der Einfluss der Benetzung der Probenoberfläche zu berücksichtigen (Kap. 11.9).

Eine Voraussetzung für das Bodenmodell ist die für kleine Andruckspannungen zulässige Vernachlässigung der Verformung des Bodens bzw. der Konsolidation. Ab einer bestimmten Andruckspannung trifft diese Voraussetzung allerdings nicht mehr zu. In diesem Fall muss das Auspressen des Porenwassers aus dem Boden beachtet werden. So kann das in den Versuchen beobachtete lokale Minimum der Adhäsionsspannung bei einer Andruckspannung von $\sigma_D = 80 \text{ kN/m}^2$ (Kap. 8.4.2) auf ein Auspressen des Porenwassers in die Grenzfläche hinein zurückgeführt werden, wodurch sich das Kapillarvolumen V_K wieder vergrößert und die Adhäsionsspannungen sinken.

Insbesondere bei leichtplastischen Böden, also Böden, die vergleichsweise leicht ihr Porenwasser abgeben, kann der Einfluss der Konsolidation nicht mehr vernachlässigt werden. Das Porenwasser wird in die Grenzfläche hineintransportiert und vergrößert des Kapillarvolumen. Die Adhäsionsspannungen nehmen in diesem Fall mit zunehmender Andruckspannung ab. Dieser Effekt wird auch von Schlick [1989] bei einem leichtplastischen Schluff beobachtet.

Bei weiterer Steigerung der Andruckspannungen steigen die Adhäsionsspannungen wiederum. In diesem Fall bildet sich unterhalb des Adhäsionstestzylinders entsprechend einer Grundbruchfigur ein Druckkegel im Boden aus. Der Druckkegel wird durch Scherflächen begrenzt. Aus diesem Bodendruckkegel wird nun insgesamt das Porenwasser ausgepresst und zwar in den umgebenden Boden hinein. Der Boden am Rand des Adhäsionstestzylinders wird ebenfalls gestört, so dass die Randeffekte jetzt nicht mehr vernachlässigt werden können. Das Kapillarovolumen wird dadurch sehr klein. Die Adhäsionsspannung kann in dem Fall sehr hohe Werte erreichen, die auch die Zugfestigkeit des Bodens überschreiten. Die Trennfuge liegt dann innerhalb des Bodens und nicht in der Grenzfläche. Hierbei bleiben entsprechend große Bodenmengen am Adhäsionstestzylinder haften. Dies wird bei Böden, die leichter ihr Porenwasser abgeben können, also bei leichtplastischen Böden, eher eintreten als bei ausgeprägt plastischen Böden. Dieser Effekt wird durch die Versuchsergebnisse (Kap. 8.4.2) bestätigt.

11.5 Abhängigkeit von der Andruckdauer und der Benetzungsdauer

Die Adhäsionsspannungen steigen mit zunehmender Andruckdauer. Der Zusammenhang ist in Abbildung 11.5 dargestellt.

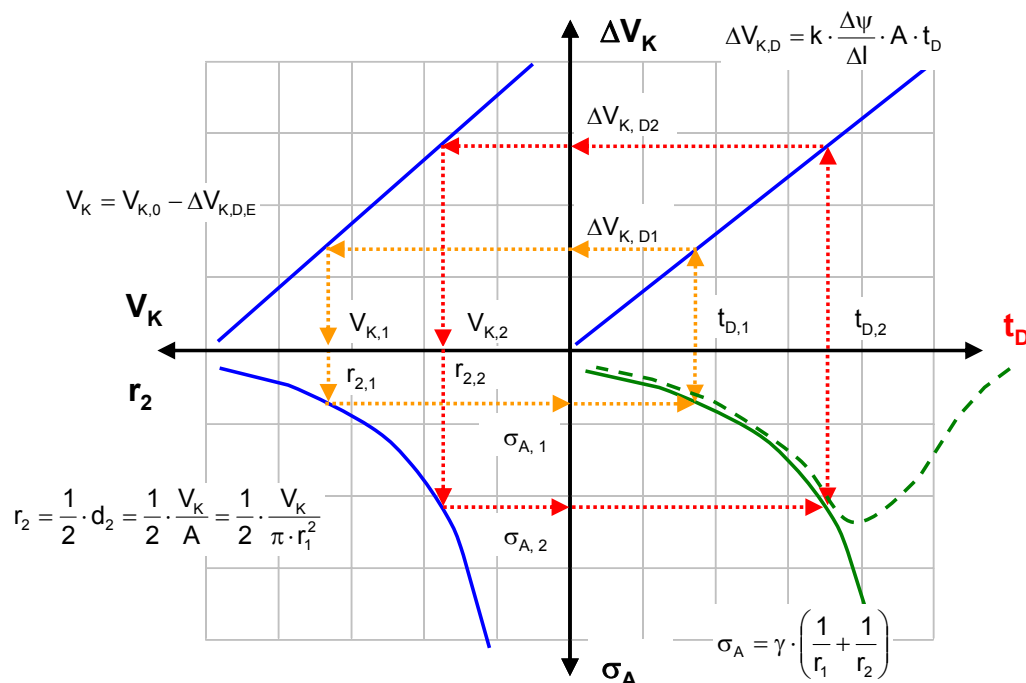


Abbildung 11.5: Abhängigkeit der Adhäsion von der Andruckdauer

Es werden zwei unterschiedlich lange Andruckzeiten $t_{D,1} < t_{D,2}$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Je länger der Adhäsionstestzylinder angedrückt wird, desto größer ist das Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruckphase

($\Delta V_{K,D,2}$) heraus transportiert wird.. Das Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in höherem Maße verringert als beim kürzeren Andruckdauer. Das Kapillarvolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher bei längerer Andruckdauer kleiner sein. Dadurch treten größere Adhäsionsspannungen auf.

Dieser Zusammenhang wurde in den Versuchen (Kap. 8.4.3) festgestellt und ebenfalls von Schlick [1989] und Thewes [1999] gefunden.

Der Versuchston ISK-E zeigt allerdings bei einer sehr langen Andruckdauer ($t_D > 20$ min) wiederum eine Abnahme der Adhäsionsspannung. Dies wird mit dem Auspressen von Porenwasser infolge Konsolidation aus der Probe heraus in die Grenzfläche hinein erklärt, wodurch sich der Flüssigkeitsfilm wieder vergrößert und die Adhäsionsspannungen sinken.

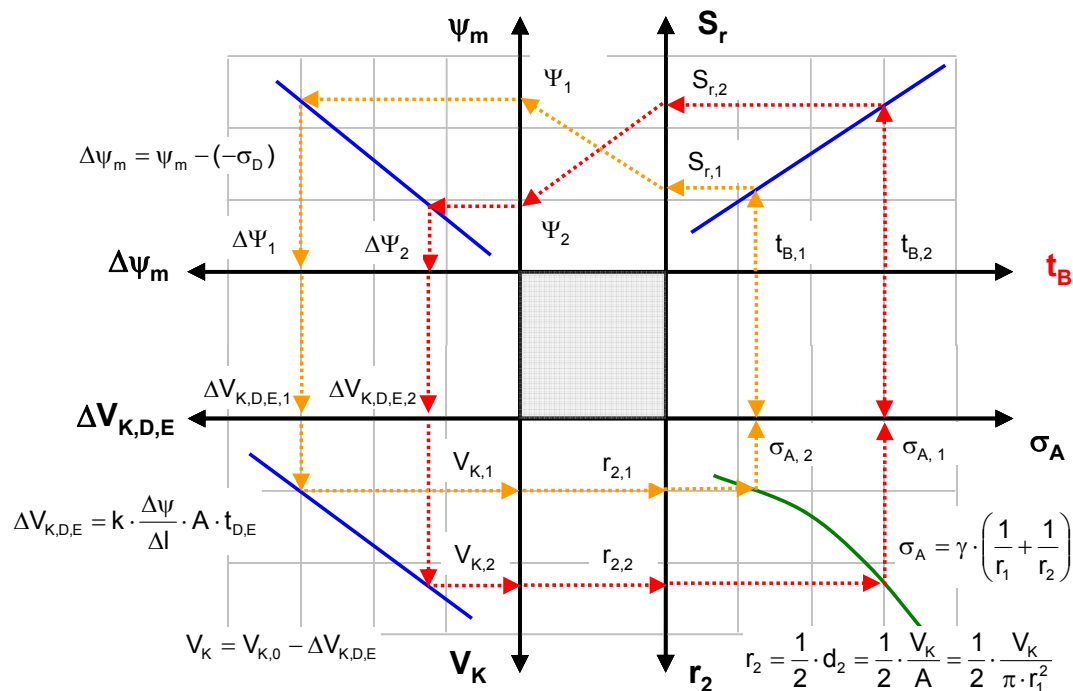


Abbildung 11.6: Abhängigkeit der Adhäsion von der Benetzungsdauer

Der Einfluss der Benetzungsdauer ist in Abbildung 11.6 dargestellt. Es werden zwei unterschiedlich lange Benetzungszeiten $t_{B,1} < t_{B,2}$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Bei längerer Benetzungsdauer wird vor Beginn der Andruckphase mehr Wasser in die Probe hineintransportiert. Dadurch steigt die Wassersättigung, wodurch das Matrixpotenzial sinkt. Der hydraulische Gradient wird dadurch verringert. Dadurch ist der Volumenstrom bzw. das Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E,2}$) heraus transportiert wird, kleiner. Das Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in geringerem Maße verringert als bei einer kürzeren Benetzungsdauer. Das

Kapillarvolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher bei kleineren Benetzungsdauern kleiner sein. Dadurch treten größere Adhäsionsspannungen auf.

Dieser Zusammenhang wird durch die Ergebnisse sowohl der eigenen Versuche als auch der Untersuchungen von Thewes [1999] experimentell bestätigt.

11.6 Abhängigkeit von der Trenngeschwindigkeit

Aussagen zur Abhängigkeit der Adhäsionsspannungen von der Trenngeschwindigkeit sind von Fountaine [1954], Riek [1963], Schlick [1989] und Beretitsch [1992] bekannt. Es wird eine Zunahme der Adhäsionsspannungen mit der Trenngeschwindigkeit beobachtet. Der physikalische Zusammenhang für diese Beobachtungen ist Abbildung 11.7 dargestellt.

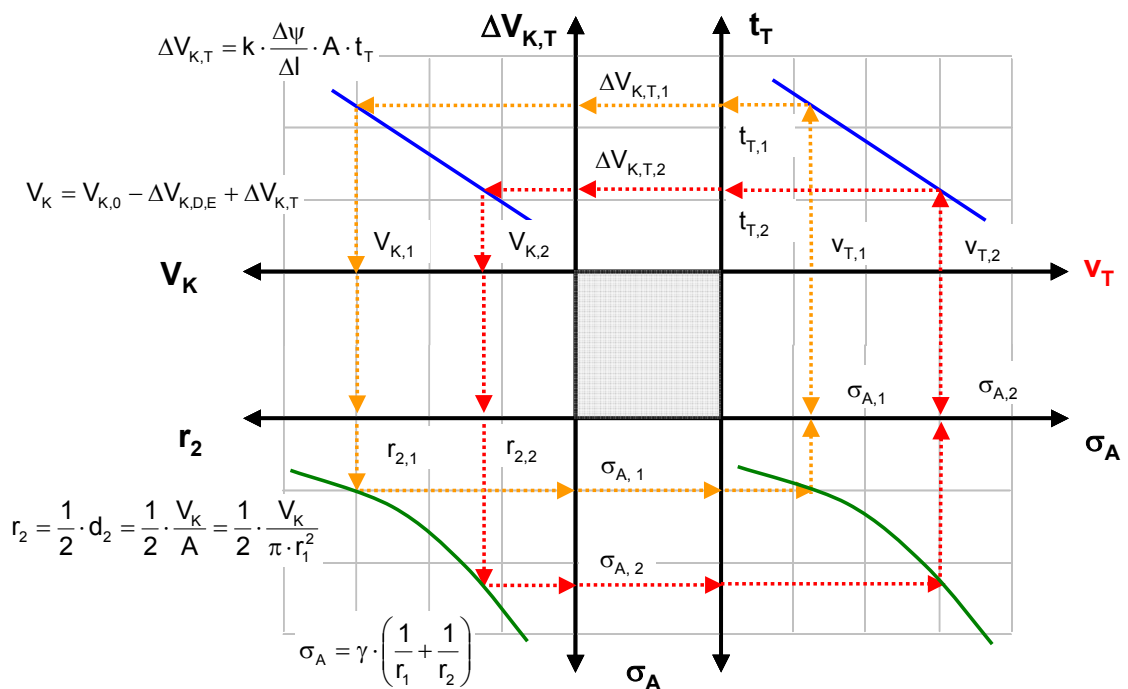


Abbildung 11.7: Abhängigkeit der Adhäsion von der Trenngeschwindigkeit

Es werden zwei unterschiedlich große Trenngeschwindigkeiten $v_{T,1} < v_{T,2}$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Bei größerer Trenngeschwindigkeit muss die Dauer der Trennphase vergleichsweise kleiner sein als bei geringerer Trenngeschwindigkeit. Dadurch ist das Volumen der Flüssigkeitsmenge $\Delta V_{K,T,2}$ kleiner, die während der Trennphase in die Grenzfläche hineintransportiert wird. Das Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in geringerem Maße vergrößert als bei einer kleineren Trenngeschwindigkeit. Das Kapillarvolumen V_K und damit die

Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher beim größeren Trenngeschwindigkeiten kleiner sein. Dadurch treten größere Adhäsionsspannungen auf.

Der Unterschied der Adhäsionsspannungen $\sigma_{A,1}$ und $\sigma_{A,2}$ muss dabei umso geringer werden, je durchlässiger der Boden ist, also je schneller Flüssigkeit in die Grenzfläche transportiert werden kann. Dies wird auch durch Ergebnisse von Fontaine [1954] belegt.

11.7 Abhängigkeit von der Rauigkeit und der Form der Oberfläche des Werkstoffes

11.7.1 Trennversuche nach dem ziehenden Trennprinzip

Aus den Ergebnissen der Adhäsionsversuche lässt sich keine deutliche Abhängigkeit von der Rauigkeit der Werkstoffoberfläche ableiten (Kap. 8.4.4). Dies wird auf den Kapillardruck als Haftmechanismus zurückgeführt (Kap. 3). Der Kapillardruck wirkt innerhalb der Kapillare, d.h. in der Grenzfläche in jeder Richtung gleich, so dass rauigkeitsbedingte Abweichungen der tatsächlichen Oberfläche von der idealisiert angenommenen, ebenen Oberfläche keine Änderung des Druckes normal zu dieser Ebene bewirken (Abbildung 11.8).

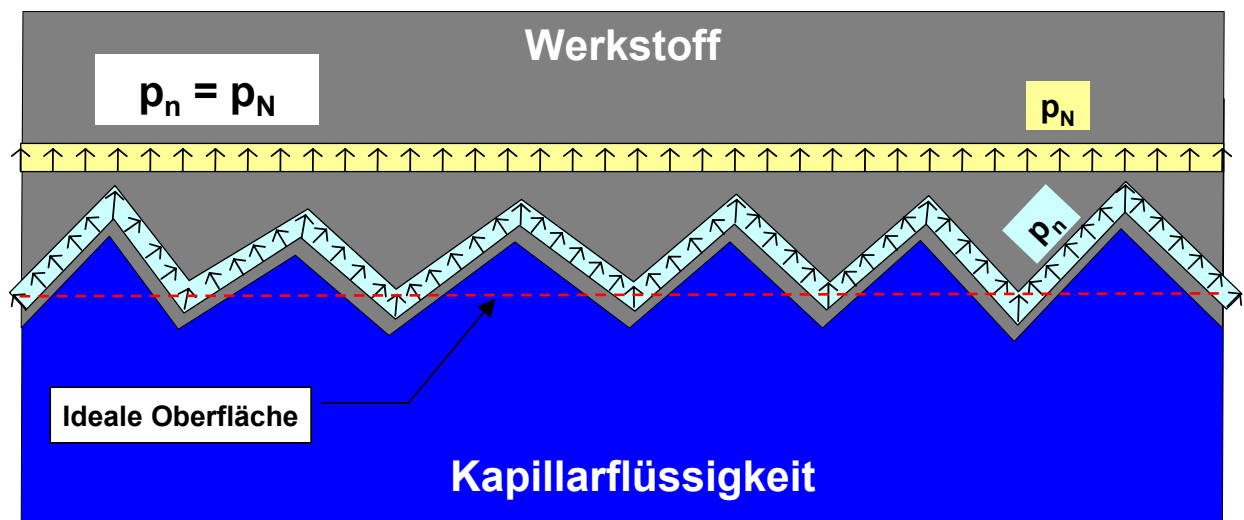


Abbildung 11.8: Abhängigkeit der Adhäsion von der Trenngeschwindigkeit

Die Größe der Rauigkeit im Bezug zu den gemessenen Adhäsionsspannungen ist in Abbildung 11.9 dargestellt. Die Rauigkeiten der Adhäsionstestzylinder mit der gedrehten und der polierten Oberfläche liegen dabei im Bereich der Dicke des Flüssigkeitsfilmes. Die Rauigkeit des Adhäsionstestzylinders mit der feinpolierten Oberfläche liegt dagegen außerhalb des Bereiches der Dicken des Flüssigkeitsfilmes. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich der Ton unter der Andruck- und der Eigengewichtspannung entsprechend der wahren Geometrie der Oberfläche verformt, so dass die Dicke der Grenzschicht weitgehend konstant bleibt.

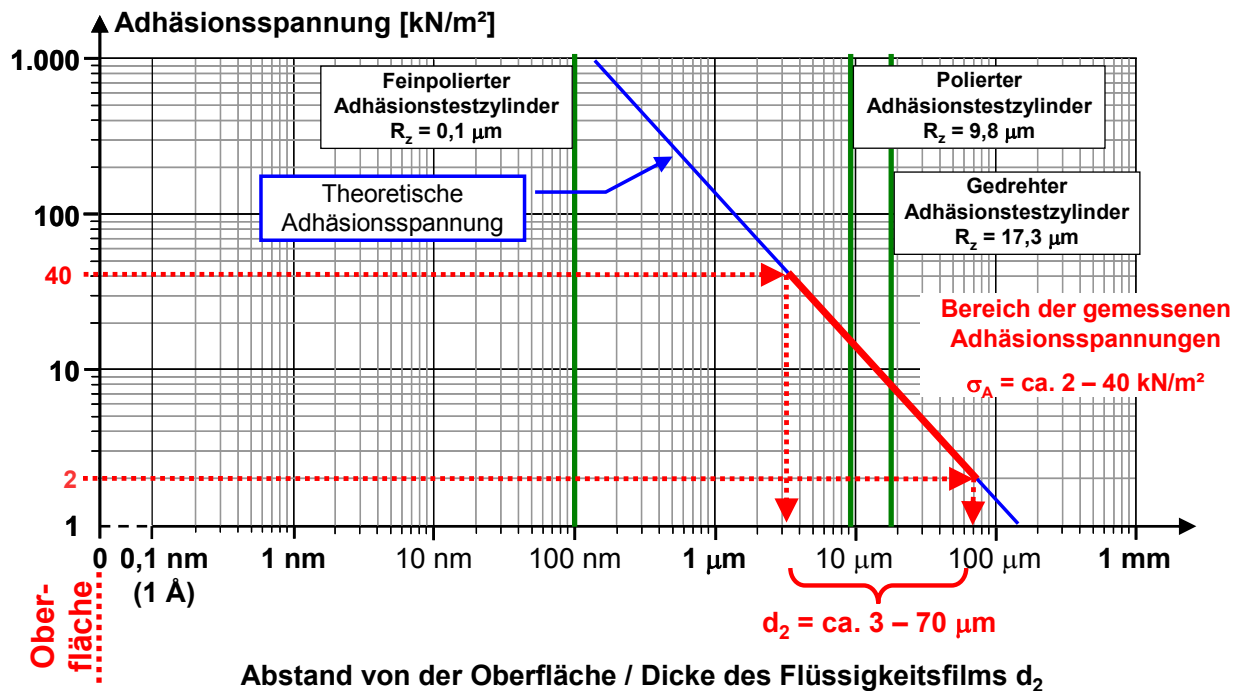


Abbildung 11.9: Rauigkeit und Dicke des Flüssigkeitsfilms

Die geringe Abhängigkeit der Adhäsion von der Rauigkeit steht scheinbar im Widerspruch zu den Ergebnissen von Riek [1963]. Allerdings wird bei seinen Versuchen die Oberfläche der Probe nicht gezielt benetzt. Die Flüssigkeit in der Grenzfläche resultiert daher aus dem Auspressen des Porenwassers in die Grenzfläche. In diesem Fall beeinflusst die Rauigkeit die Adhäsionsspannungen erheblich, da hier Luftblasen in die Grenzfläche eingeschlossen werden können. Es kann dann kein geschlossener Flüssigkeitsfilm entstehen. Die Menge der Luftblasen hängt von der Rauigkeit ab, wobei umso mehr Luftblasen eingeschlossen werden, je größer die Rauigkeit der Oberfläche ist. Diesen Zusammenhang hat Riek [1963] auch experimentell gezeigt.

Die Rauigkeit kann aber Einfluss auf das Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$ haben. Wenn die Struktur der Rauigkeit dergestalt ist, dass sie radiale Fließwege darstellen, kann beim Andrücken des Adhäsionstestzylinders ggf. eine größere Menge Flüssigkeit seitlich verdrängt werden. Das Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$ würde dadurch geringer sein, was größere Adhäsionsspannungen zur Folge hätte. Die Form der Oberfläche und die Struktur der Rauigkeit des Adhäsionstestzylinders beeinflussen die Adhäsionsspannungen daher. Begünstigt die Struktur der Rauigkeit oder die Form der Oberfläche ein Abfließen der Flüssigkeit aus der entstehenden Grenzfläche, so werden höhere Adhäsionsspannungen beobachtet, als bei solchen Oberflächen, welche die Flüssigkeit eher zurückhalten oder Luftblasen einschließen können. Dieser Zusammenhang kann aus den Ergebnissen der Versuche von Riek [1963] gefolgert werden.

11.7.2 Trennversuche nach dem scherenden Trennprinzip

Zum Adhäsionsverhalten nach dem scherenden Trennprinzip wurden zahlreiche Untersuchungen mit Scherversuchen durchgeführt [Hammond & Boumekik, 2006], [Thewes, 1999], [Zimnik, 1999], [Kooistra, 1998], [Wilms, 1995], [Beretitsch 1992], [Jancsecz 1991], [Littleton, 1976], [Riek, 1963], [Potyondy, 1961]. Es wird i.A. eine Zunahme des Scherwiderstandes mit der Rauigkeit festgestellt.

Gemäß dem Kapillarmodell (Kap. 3) dürfte es bei einem scherenden Trennprinzip nur zu einem Rutschen des Werkstoffes auf der Tonoberfläche kommen, wobei der Scherwiderstand von der Viskosität der Kapillarflüssigkeit abhinge. Dies gilt allerdings nur für ideal ebene Flächen. Da sowohl die Werkstoffoberfläche als auch insbesondere die Tonoberfläche nicht ideal eben sind und die Scherfuge in allen Versuche starr und aufgezwungen ist, kommt es bei Verschiebungen zwangsläufig zu einem direkten Kontakt der Bodenkörner mit der Oberfläche. Dies führt zu einem reibungsbedingten Widerstand gegen die aufgezwungene Scherung. Dieser muss umso größer sein, je rauer die Oberfläche des Werkstoffes ist. Bei Versuchen nach dem scherenden Trennprinzip hat die Rauigkeit daher einen enormen Einfluss auf den Scherwiderstand.

Bei einem scherenden Trennprinzip werden also sowohl Rutschvorgänge als auch Schervorgänge stattfinden. Dies wird auch von Littleton [1976] beschrieben. In seinen Versuchen waren 90 % der Oberfläche mit Tonpartikeln behaftet. Die z.B. von Jancsecz [1991] festgestellte Abhängigkeit dieses Scherwiderstandes vom Wassergehalt kann allerdings durchaus auch mit Adhäsionsspannungen (normal zur Oberfläche) erklärt werden. Die Größe des Scherwiderstandes wird durch die Kraft bzw. die Spannung normal zur Scherfuge, dem Reibungswinkel und der Kohäsion bestimmt (Gln. 11.1).

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (\text{Gln. 11.1})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
τ	: Scherwiderstand	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
c	: Kohäsion	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
σ_n	: Normalspannung in der Scherfuge	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
φ	: Reibungswinkel	Bogenmaß	[-]

Die Größe der Spannung normal zur Scherfuge wird außer durch die aufgebrachte äußere Normalspannung von der Adhäsionsspannung beeinflusst (Gln. 11.2). Hierfür ist der in den Kap.

11.4 und Kap. 11.9 beschriebene Zusammenhang zwischen Andruckspannung und Benetzung zu berücksichtigen.

$$\sigma_n = (\sigma_D + \sigma_A) \quad (\text{Gln. 11.2})$$

Aufgrund der unklaren Spannungsverteilung in der Scherfläche kann keine Aussage getroffen werden, ob die Adhäsionsspannung dabei in voller Höhe oder nur zu einem Teil zu berücksichtigen ist. Nach den Auswertungen von Thewes [1999] muss von letzterem ausgegangen werden.

Aus den vorgenannten Gründen wird das scherende Trennprinzip zur Messung von Adhäsionskräften bzw. zur Untersuchung des Adhäsionsverhaltens als ungeeignet angesehen.

11.8 Abhängigkeit vom Material des Werkstoffes

Das Material des Werkstoffes wird über den Benetzungswinkel berücksichtigt. Dieser steuert die Größe der Randkräfte. Wie Kap. 3 gezeigt wird, können die Randkräfte gegenüber den Kapillarkräften hier vernachlässigt werden. Der der Adhäsionsspannung gleichzusetzende Kapillardruck hängt nach Gln. 3.12 nur noch von der Geometrie der Haftflächen und der Oberflächenspannung ab.

$$\sigma_A = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Gln. 3.12})$$

Die Versuchsergebnisse zur Untersuchung des Einflusses des Materials (Kap. 8.4.4) können so befriedigend erklärt werden.

Fontaine [1954] kommt mit einem anderen theoretischen Ansatz zu dem Schluss, dass der Randwinkel der Benetzung, der eine Funktion des Materials des Werkstoffes ist, keinen Einfluss auf die Adhäsionskräfte hat.

Dies steht scheinbar im Widerspruch zu den Ergebnissen von Riek [1963]. Allerdings ist hier wieder zu berücksichtigen, dass die Oberfläche der Probe nicht gezielt benetzt wird. Die von Riek [1963] festgestellten Unterschiede der Adhäsion bei verschiedenen Materialien dürften auf die Überlagerung der Einflüsse der Rauigkeit der Oberflächen und der dadurch bedingten Verteilung des ausgepressten Porenwassers in der Grenzfläche zurückzuführen sein (vgl. hierzu Kap. 11.7.1).

11.9 Abhängigkeit von der Benetzung

Die Benetzung der Oberfläche hat einen enormen Einfluss auf die Größe der Adhäsionsspannungen. Dies zeigen die Ergebnisse der Versuche ohne Benetzung (Kap. 8.4.5) deutlich. Dabei verhalten sich der leichtplastische Versuchston KI-S und der mittelpplastische Versuchston KI-W gänzlich anders als die ausgeprägt plastischen Tone ISK-E und SI-B. Bei den Versuchstonen KI-S und KI-W sind die Adhäsionsspannungen bei den Versuchen ohne Benetzung deutlich größer sind als bei den Versuchen mit Benetzung. Bei den Versuchen ohne Benetzung an den Tönen ISK-E und SI-B sind die Adhäsionsspannungen dagegen deutlich kleiner als bei den jeweiligen Versuchen mit Benetzung.

Der Grund liegt in der Ausbildung des Flüssigkeitsfilmes in der Grenzfläche. Bei ausgeprägt plastischen Tönen ist das Wasserbindevermögen größer als bei leichtplastischen Tönen. Dies erklärt die Ergebnisse der Versuche am leichtplastischen Ton KI-S. Bei diesen Versuchen wird während der Andruckphase Wasser aus dem Boden in die Grenzfläche abgegeben. Wird die Oberfläche zusätzlich benetzt, wird das Kapillarovolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus vergrößert. Dadurch treten vergleichsweise kleine Adhäsionsspannungen auf. Sie liegen i.A. unterhalb des Niveaus der Adhäsionsspannung von $\sigma_A = 5 \text{ kN/m}^2$, die zwischen zwei Stahlzylindern gemessen wurde (Kap. 3.2). Wird die Oberfläche allerdings nicht gezielt benetzt, kann der Flüssigkeitsfilm nur durch das Auspressen des Porenwassers in die Grenzfläche gelangen. Wird dabei ein geschlossener Flüssigkeitsfilm erzeugt, erreichen die Adhäsionsspannungen ein Maximum. Die Ausbildung eines geschlossenen Flüssigkeitsfilms ist eine Funktion der Andruckspannung und der Andruckdauer, bzw. des Konsolidationsverhaltens des Bodens. Ist die Andruckspannung zu gering oder die Andruckdauer zu kurz, kann sich ein Flüssigkeitsfilm nur partiell ausbilden. Die Adhäsionsspannungen sind dann kleiner. Dies zeigen die Ergebnisse der Versuche ohne Benetzung am Versuchston KI-S für eine Andruckspannung von 20 kN/m^2 und 50 kN/m^2 .

Mit zunehmender Plastizität verringert sich die Wasserabgabe aus dem Boden. Daher liefern auch die Versuche ohne Benetzung an den ausgeprägt plastischen Tönen ISK-E und SI-B geringe Adhäsionsspannungen. Hier ist offenbar noch kein geschlossener Flüssigkeitsfilm ausgebildet. Bei den Versuchen mit Benetzung hingegen ist durch die Benetzung ein geschlossener Flüssigkeitsfilm vorhanden. Die Adhäsionsspannungen sind daher größer als ohne Benetzung.

Für eine Beurteilung des Verklebungsrisikos bei Tunnelvortrieben muss der Boden daher im Zusammenhang mit dem Vortriebsverfahren beurteilt werden. Wird eine Vortriebsmaschine im

offenen Modus betrieben, können bei einem leichtplastischen Ton offenbar auch nennenswerte Adhäsionsspannungen auftreten.

11.10 Abhängigkeit von der Viskosität der Benetzungsflüssigkeit

Der Einfluss der Viskosität der Benetzungsflüssigkeiten ist in Abbildung 11.10 veranschaulicht.

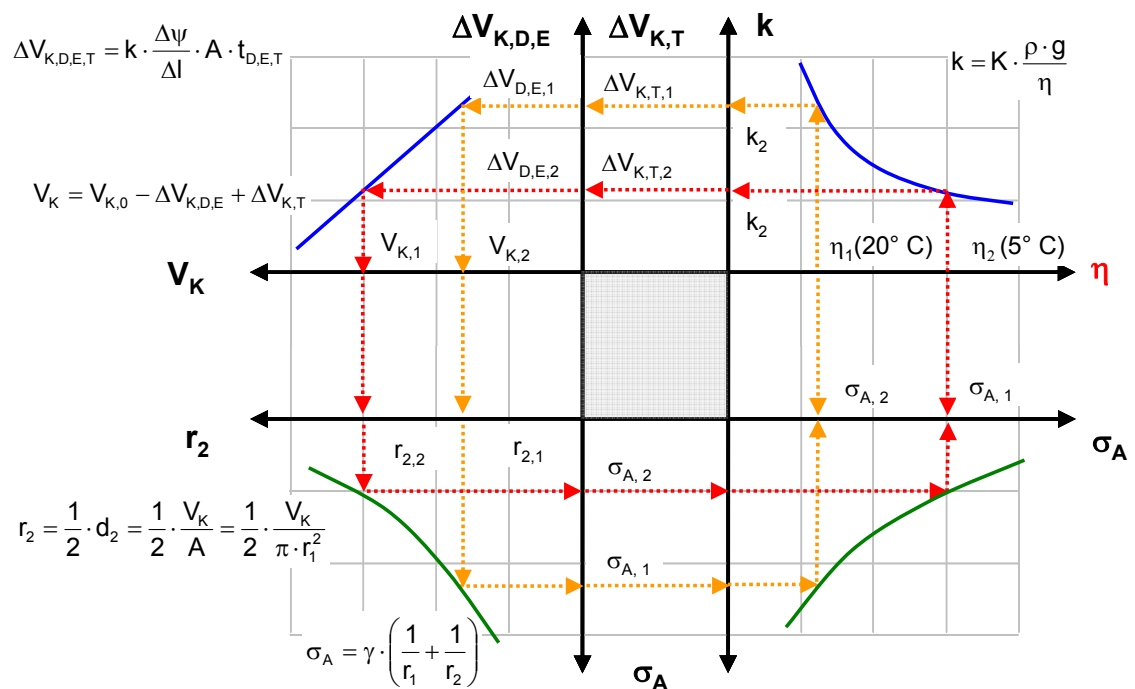


Abbildung 11.10: Abhängigkeit der Adhäsion von der Viskosität der Benetzungsflüssigkeit

Es werden zwei unterschiedlich große dynamische Viskositäten $\eta_1 < \eta_2$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Bei größerer Viskosität, wie z.B. bei 5° C, ergibt sich aus Gl. 10.5 ein kleinerer Durchlässigkeitskoeffizient als bei höherer Viskosität. Sowohl das Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E,2}$) heraustransportiert wird, als auch das Volumen der Flüssigkeitsmenge, die während der Trennphase in die Grenzfläche hineintransportiert wird ($\Delta V_{K,T,2}$) ist kleiner. Allerdings betrifft das die Änderung des Flüssigkeitsvolumens aufgrund der sehr unterschiedlichen Zeiten von Trennphase und Andruck-/Eigengewichtsphase in viel stärkerem Maße. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird dadurch bei größeren Viskositäten in stärkerem Maße verkleinert als bei kleinerer Viskosität. Das Kapillarovolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher beim größeren Viskositäten kleiner sein. Dadurch treten größere Adhäsionsspannungen auf.

11.11 Abhängigkeit von der Elektrolytkonzentration

Eine Erhöhung der Elektrolytkonzentration der Benetzungsflüssigkeit (z.B. durch Zugabe von Salzen) bewirkt nach den Ergebnissen von Thewes [1999] eine Reduktion der Adhäsionsspannungen. Dies wird mit der Verringerung der Wasseraufnahme infolge der Verringerung des Konzentrationsunterschiedes der Kationen in den Zwischenschichten der Tone und den Kationen der Flüssigkeit erklärt. Die Abhängigkeit ist in Abbildung 11.11 veranschaulicht.

Es werden zwei unterschiedliche Elektrolytkonzentrationen der Benetzungsflüssigkeit $c_1 < c_2$ bei ansonsten gleichen Parametern verglichen. Durch die größere Elektrolytkonzentration c_2 kann das Wasseraufnahmevermögen w_A verringert werden (Anhang A). Dadurch werden auch das Matrixpotenzial und somit auch der hydraulische Gradient verringert. Dies führt zu einem geringeren Volumen der Flüssigkeitsmenge, die aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E,2}$) heraustransportiert wird. Das Anfangskapillarvolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in kleinerem Maße verringert als bei der geringeren Konzentration c_1 . Das Kapillarvolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher bei der größeren Konzentration größer sein. Dadurch treten bei größeren Elektrolytkonzentrationen kleinere Adhäsionsspannungen auf.

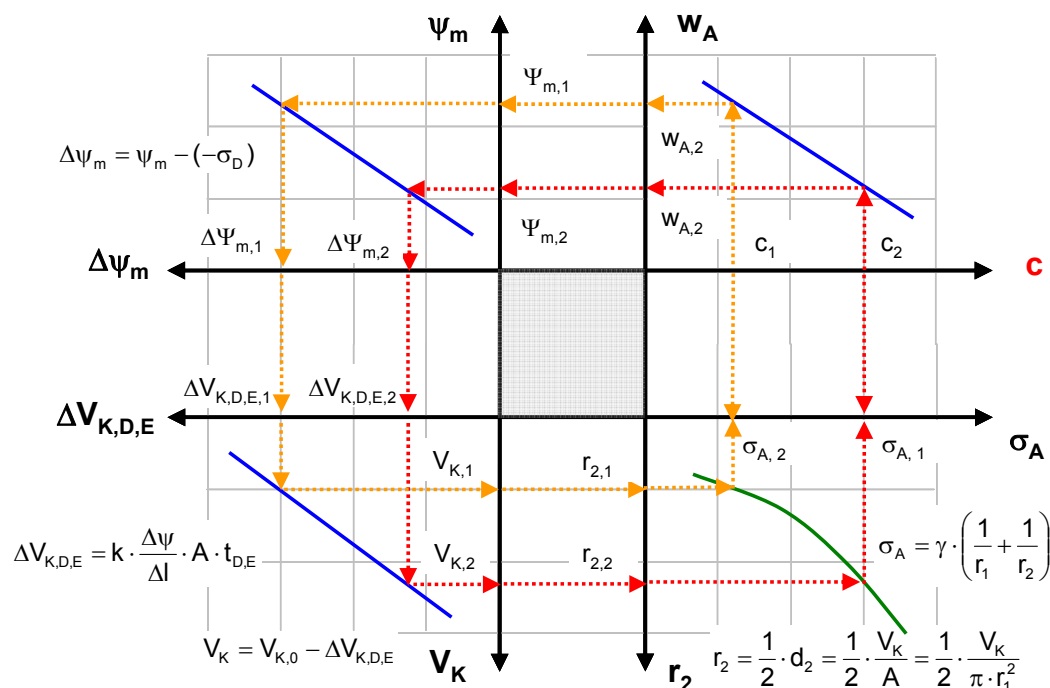


Abbildung 11.11: Abhängigkeit der Adhäsion von Elektrolytkonzentration der Benetzungsflüssigkeit

11.12 Abhängigkeit von der Oberflächenspannung des Fluides

Der Einfluss der Oberflächenspannung der Benetzungsflüssigkeit ist direkt an der Gleichung zur Berechnung der Adhäsionsspannung aus dem Kapillardruck (Gln. 3.12) ersichtlich:

$$\sigma_A = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Gln. 3.12})$$

In diese Gleichung gehen außer den Radien r_1 und r_2 nur noch die Oberflächenspannung γ ein, so dass – bei ansonsten gleichen Randbedingungen - die Adhäsionsspannung linear davon abhängt.

Die Zugabe z.B. von Tensiden zur Benetzungsflüssigkeit verringert deren Oberflächenspannung erheblich, so dass dementsprechend auch geringere Adhäsionsspannungen beobachtet werden [Thewes, 1999]. Ein ähnliches Ergebnis erhält Fontaine [1954], der bei Verwendung von Nitrobenzen und Alkohol mit deutlich geringeren Oberflächenspannungen als Wasser auch deutlich geringere Adhäsionsspannungen misst.

11.13 Abhängigkeit von polymeren Zusätzen zur Benetzungsflüssigkeit

Der Einfluss der Zugabe von bestimmten Polymeren zur Benetzungsflüssigkeit bewirkt nach den Versuchen von Thewes [1999] eine Erhöhung der Adhäsionsspannungen. Dies kann auf folgende Effekte zurückgeführt werden:

- Die polymermodifizierte Benetzungsflüssigkeit hat vermutlich eine größere Oberflächenspannung als Wasser. Dadurch müssen nach Gleichung 3.12 höhere Adhäsionsspannungen auftreten.
- Es kann in der Grenzschicht zur Ausbildung einer Polymerschicht kommen, die durch die Vernetzung der Polymere einen starken Zusammenhalt besitzt.
- Die gegenüber einem Wassermolekül größere Ladung der Polymere bedingt einen größeren hydraulischen Gradienten, der zu einem größeren Flüssigkeitsvolumen führt, das aus der Grenzfläche während der Andruck- und der Eigengewichtsphase ($\Delta V_{K,D,E,2}$) heraustransportiert wird. Das Anfangskapillarovolumen $V_{K,0}$ wird dadurch in größerem Maße verringert. Das Kapillarovolumen V_K und damit die Dicke des Flüssigkeitsfilmes bzw. der Radius r_2 dessen Meniskus muss daher kleiner sein als bei Verwendung von Wasser ohne Zusätzen. Dadurch treten größere Adhäsionsspannungen auf.

Die Grundlagen, um die Wechselwirkungen bei polymermodifizierten Spülungen beurteilen zu können, reichen derzeit noch nicht für eine klare Aussage aus. Es existieren z.B. keine Daten zur Oberflächenspannung von polymermodifizierten Spülungen. Hierzu sind vertiefende Untersuchungen erforderlich.

12 Folgerungen für die Planung und Bauausführung

12.1 Quantifizierung des Verklebungspotenzials eines Bodens

Das Anhaften eines Bodens an einer Werkstoffoberfläche ist auf Kapillarkräfte des Flüssigkeitsfilmes in der Grenzfläche zwischen Boden und Werkstoff zurückzuführen. Die Adhäsionsspannungen sind dabei umso größer, je dünner dieser Flüssigkeitsfilm ist. Die Dicke dieses Flüssigkeitsfilmes wird wesentlich durch das Matrixpotenzial und die Durchlässigkeit eines Bodens gesteuert. Die Adhäsion ist daher eine Eigenschaft des Baugrundes. Diese ist nicht konstant, sondern veränderlich und somit eine Zustandsgröße.

Wie anhand des bodenphysikalischen Modells gezeigt wird, ist das Anhaften von Böden an Werkstoffoberflächen ein komplexer Vorgang, der durch die Eigenschaften eines Bodens, seinem jeweiligen Zustand sowie seiner Behandlung bestimmt wird.

Das Ableiten der Adhäsionseigenschaften aus einem einzelnen bekannten bodenmechanischen Standardkennwert ist direkt nicht möglich. Aussagen bzgl. des Zusammenhangs des Adhäsionsverhaltens eines Bodens zu einzelnen, isoliert betrachteten Einflussgrößen, wie z.B. der Korngrößenverteilung, der Plastizität, der Konsistenz, der Porenzahl, dem Gehalt an quellfähigen Tonmineralen sind nur eingeschränkt möglich (Kap. 11).

Die Wechselwirkung der verschiedenen Einflussgrößen kann mit dem entwickelten Adhäsionsversuch durch die Adhäsionsspannung bzw. das Adhäsionsverhalten eines Tons beschrieben werden. Dabei werden die verschiedenen Einflussgrößen durch die gemessenen Adhäsionsspannungen ausgedrückt.

Dazu wird vorgeschlagen, die Adhäsionseigenschaften für einen festzulegenden Konsistenzbereich zu untersuchen. Die Versuche sollten an mindestens drei Konsistenzen durchgeführt werden: die untere und die obere insitu vorkommende Konsistenz sowie deren Mittelwert. Die Veränderung der Konsistenz des Bodens durch das Bauverfahren kann die Untersuchung des Bodens für weitere Konsistenzzahlen notwendig machen. Je nach Abbausystem müssen die Versuche mit oder ohne gezielte Benetzung der Probenoberfläche durchgeführt werden.

Für die Bewertung der Versuchsergebnisse muss einerseits der Absolutwert der Adhäsionsspannungen und andererseits die Veränderung der Adhäsionsspannungen mit der Konsistenzzahl betrachtet werden (Abbildung 12.1). Als Grenzwert für die Bewertung des Absolutwertes der Adhäsionsspannungen wird dabei vorläufig die Adhäsionsspannung gewählt,

die auch zwischen zwei Stahlzylindern gemessen wurde. Diese beträgt $\sigma_A = 5 \text{ kN/m}^2$ (Kap. 3.2). Diese Festlegung muss anhand von zukünftigen Erfahrungswerten angepasst werden. Liegen die Versuchsergebnisse oberhalb dieses Niveaus (Beispielboden 1), muss mit erheblichen Anhaftungen des Bodens an den Werkstoffoberflächen gerechnet werden. Entsprechend sind umfangreiche Maßnahmen zu deren Vermeidung einzuplanen. Mit entsprechend geringen Vortriebsgeschwindigkeiten ist in diesen Böden zu rechnen. Solche Böden werden daher als Böden mit einem hohen Verklebungspotenzial eingestuft.

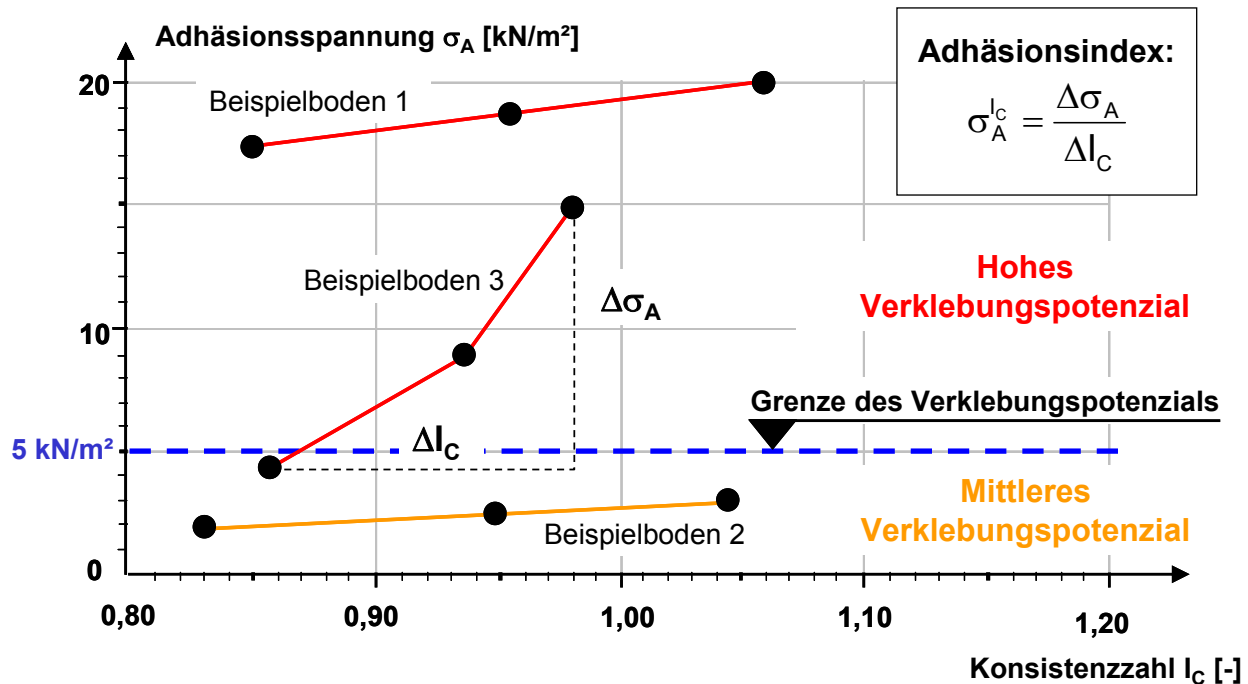


Abbildung 12.1: Verklebungspotenzial von Böden

Liegen die Adhäsionsspannungen unterhalb des Niveaus von 5 kN/m^2 (Beispielboden 2) und bleiben die Adhäsionsspannung über den untersuchten Konsistenzbereich weitgehend unverändert, sollte der Aufwand für Maßnahmen zur Vermeidung von Verklebungen geringer sein. Entsprechend würden solche Böden als Böden mit einem mittleren Verklebungspotenzial eingestuft.

Ab welchem Niveau der Adhäsionsspannungen mit nur noch geringem Aufwand für die Vermeidung von Verklebungen zu rechnen ist, kann auf der Grundlage der vorliegenden Versuche noch nicht quantifiziert werden. Hierzu sind weitere Versuchsreihen mit entsprechenden Böden erforderlich.

Die Konsistenz eines Bodens kann sich durch den Abbauprozess verändern. Daher muss auch die Änderung der Adhäsionsspannung mit der Konsistenzzahl bewertet werden. Dazu wird der Adhäsionsindex als mittlere Steigung der Adhäsionsspannung, ausgedrückt als der Quotient

aus der Änderung der Adhäsionsspannungen und der Änderung der Konsistenzzahl, eingeführt (Gln. 12.1).

$$\sigma_A^{I_C} = \frac{\Delta\sigma_A}{\Delta I_C} \quad (\text{Gln. 12.1})$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
$\sigma_A^{I_C}$: Adhäsionsindex	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]

Bei großen Unterschieden der Adhäsionsspannungen, d.h. bei einem hohen Adhäsionsindex reagiert der Boden sehr empfindlich auf Änderungen seines Zustandes (Beispielboden 3). Es müssen daher Maßnahmen getroffen werden, um einen bestimmten Zustand eines Bodens zu erhalten, so dass der Vortrieb gezielt nur auf diesen Zustand abgestimmt werden kann. Die Maßnahmen hierzu machen es erforderlich, auch solche Böden als Böden mit einem hohen Verklebungspotenzial einzustufen.

Je nach geplantem Vortriebsverfahren bzw. Betriebsweise müssen ggf. zusätzlich Versuche ohne Benetzung der Probenoberfläche durchgeführt und in vergleichbarer Weise bewertet werden.

12.2 Bewertung des Adhäsionsverhalten des Versuchstone

Die Klassifikation der Versuchstone entsprechend dem in Kap. 12.1 erläuterten Schema ist in der Abbildung 12.2 (siehe hierzu Kap. 8.4.1) dargestellt.

Die Adhäsionsspannungen der beiden Versuchstone KI-W und SI-B liegen deutlich über der Grenze von 5 kN/m² und wären damit als Tone mit einem hohen Verklebungspotenzial einzustufen. Die Adhäsionsspannungen der Versuchstone KI-S und ISK-E liegen im Konsistenzbereich bis $I_C \approx 1,05$ unterhalb der gewählten Grenze von 5 kN/m². Ab einer Konsistenz $I_C \approx 1,05$ überschreiten die Adhäsionsspannungen dieser Tone diese Grenze. Demnach wären auch diese Tone als Tone mit einem hohen Verklebungspotenzial zu klassifizieren. Im Falle des Versuchstons ISK-E (Tonfazies des Lauenburger Tons), für den in-situ auch solche Konsistenzzahlen gemessen wurden, wird diese Klassifikation auch durch die Erfahrungen bei Tunnelvortrieben bestätigt [Luesse, 1999 und Luesse, 2004].

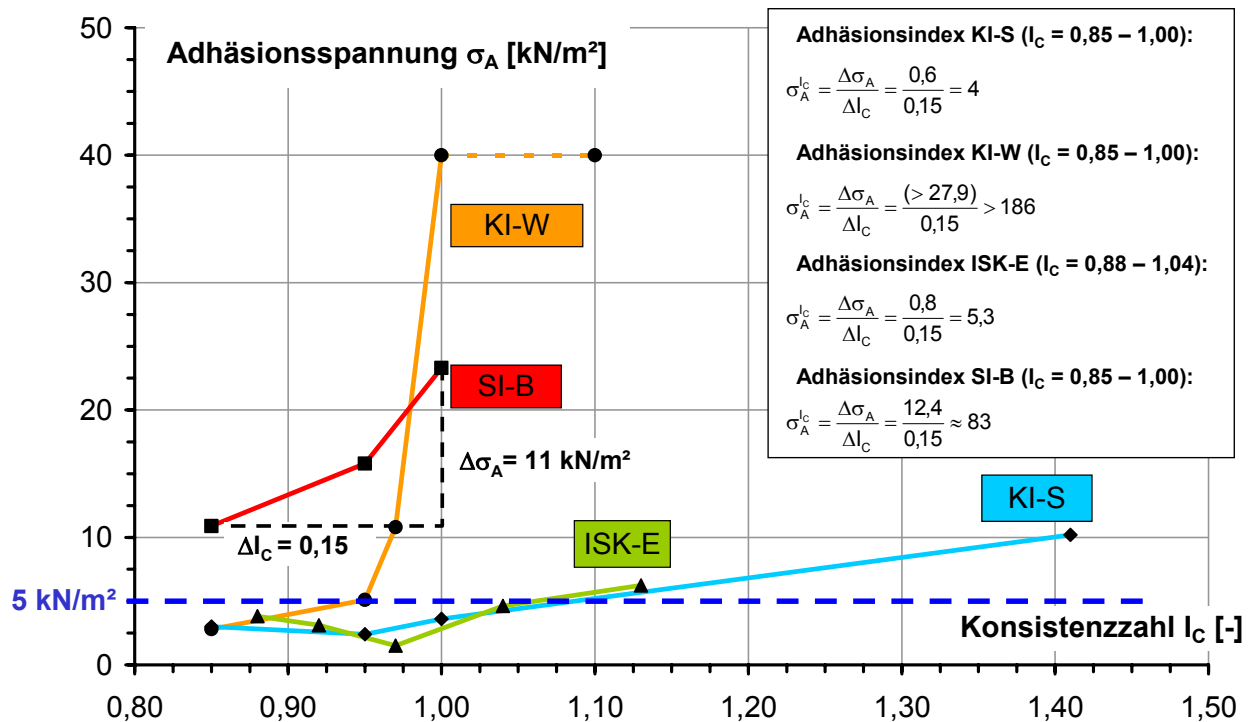


Abbildung 12.2: Verklebungspotenzial von Böden

Das Adhäsionsverhalten der Versuchstone im Bezug zur Änderung der Konsistenz – ausgedrückt durch den Adhäsionsindex – ist höchst unterschiedlich. Die Versuchstone KI-W und SI-B zeigen eine deutlich größere Sensitivität gegenüber Änderungen ihrer Konsistenz (Adhäsionsindex $\sigma_A^{I_c} = 186$ bzw. 83), als die Versuchstone KI-S und ISK-E (Adhäsionsindex $\sigma_A^{I_c} = 4$ bzw. $5,3$). Eine Erklärung hierfür wird mit dem bodenphysikalischen Modell und der Durchlässigkeit der Tone gegeben (Kap. 11.1). Böden, deren Adhäsionseigenschaften empfindlich auf Änderungen des Wassergehaltes reagieren (großer Adhäsionsindex), sollten daher so wenig wie möglich durch das Abbaufahren verändert werden. Das Adhäsionsverhalten der Versuchstone ISK-E und KI-S ist vergleichsweise unempfindlich gegenüber Änderungen der Konsistenz (kleiner Adhäsionsindex). Diese Tone werden daher als weniger problematisch im Hinblick auf Verklebungen bei Änderung der Konsistenz eingeschätzt. Beim Versuchston KI-S muss dabei aber die Randbedingung der Benetzung der Oberfläche beachtet werden.

Der Versuchston KI-W, der keine quellfähigen Tonminerale enthält, kann hohe Adhäsionsspannungen aufbauen, die in der Größenordnung des Versuchstons SI-B, also eines an quellfähigen Tonmineralen reichen Tones, liegen. Dies ist überraschend, da bisher hohe Adhäsionsspannungen in Verbindung mit dem Vorhandensein quellfähiger Tonminerale gebracht werden [Thewes, 1999]. Dies muss zukünftig bei der Bewertung des Tonmineralbestandes beachtet werden.

Wie der Vergleich der Versuchsergebnisse ohne und mit gezielter Benetzung der Probenoberfläche zeigt, ist der Flüssigkeitsfilm in der Grenzfläche entscheidend für die Größe der Adhäsionsspannungen. Je nach Plastizität eines Bodens kann ein Wasserfilm auch durch Konsolidation aus dem Porenwasser des Bodens erzeugt werden. Der Versuchston KI-S zeigt ohne Benetzung mit $9,7 \text{ kN/m}^2$ bzw. $19,3 \text{ kN/m}^2$ auch größere Adhäsionsspannungen als alle anderen Tone ohne Benetzung und auch eine vergleichbare Adhäsionsspannung wie der Versuchston SI-B mit Benetzung. Dies zeigt, dass auch ein leichtplastischer Ton, hier aus einem veränderlichen festen Tonstein, offenbar erhebliche Adhäsionsspannungen aufbauen kann, wenn kein Wasser zusätzlich herangeführt wird. Diese Erkenntnis steht z.T. im Widerspruch zu einer Forderung von Weh et al. [2009], nach dem bei einem Vortrieb mit teilgefüllter Abbaukammer Wasser möglichst fernzuhalten ist, um den Boden ohne Verklebungserscheinungen fördern zu können. Für die Betriebsweise und die Konditionierung des Ausbruchmaterials bei Tunnelvortrieben im Tonsteinen des Lias α des Stuttgarter Raums, aus dem das Material für die Versuche entnommen wurde, ist dies unbedingt zu beachten.

Die Rauigkeit der Werkstoffoberfläche und dessen Material haben einen untergeordneten Einfluss auf die Adhäsionsspannungen (Kap. 11.7). Dies bedeutet, dass zukünftige Forschungsarbeiten auf bodenphysikalische Fragestellungen fokussiert werden können. Rauigkeit und Material der Werkstoffe spielen allerdings dann eine Rolle, wenn Scherbewegungen in der Grenzfläche auftreten. In diesem Fall hat die Rauigkeit einen großen Einfluss auf den Schwerwiderstand. Überall dort, wo Scherbewegungen auftreten, sollten die Oberflächen der Werkstoffe daher möglichst glatt sein, bzw. die Orientierung der Rauigkeit entsprechend der Bewegungsrichtung gestaltet werden.

12.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Verklebungen

Grundsätzlich sollte die Trasse eines Tunnels außerhalb von zum Verkleben neigenden Böden liegen. Dies wird allerdings nur in Ausnahmefällen umzusetzen sein. Daher muss das Vortriebskonzept primär auf die Vermeidung von primären Anhaftungen ausgerichtet werden. Dazu sollte folgende Strategie verfolgt werden:

1. Ein längerer oder häufiger Kontakt von gelöstem Boden mit den Werkstoffoberflächen ist zu vermeiden.
2. Die Dicke des Flüssigkeitsfilmes in der Grenzfläche bestimmt die Adhäsionskraft. Der Flüssigkeitsfilm in der Grenzfläche muss so dick wie möglich gehalten werden.

Ein längerer Kontakt von gelöstem Boden kann durch strömungsgünstige, hindernisfreie und kurze Transportwege sowie durch hohe Transportgeschwindigkeiten erreicht werden. Ein häufiger Kontakt kann durch Verkleinerung der spezifischen Oberfläche des gelösten Bodens vermieden werden. Dazu müssen die gelösten Bodenteile möglichst groß sein. Andererseits besteht bei größeren gelösten Bodenteilen ein höheres Risiko des Verstopfens. Diese beiden Aspekte müssen daher optimiert werden.

Der Flüssigkeitsfilm in der Grenzfläche kann ggf. durch gezielte Bewässerung der Werkstoffoberflächen beeinflusst werden, besonders an neuralgischen Stellen, d.h. in Bereichen mit geringer Transportgeschwindigkeit des gelösten Bodens oder wo der gelöste Boden großen mechanischen Kräften ausgesetzt ist (z.B. die Bereiche hinter den Brecherbacken oder an den Werkzeugträgern).

Die Adhäsion hängt wesentlich von der Matrixspannung ab, die ihrerseits von der Wassersättigung abhängt. Je größer der Sättigungsgrad ist, desto geringer ist die Matrixspannung. Bei völlig wassergesättigten Böden ist die Matrixspannung gleich null. Daher sind Maßnahmen, die voraussetzungslos den Sättigungsgrad erhöhen geeignet, die Verklebungsneigung eines Bodens zu reduzieren.

Die Auswirkungen eines Einsatzes von Zusätzen kann mit dem Adhäsionsversuch untersucht werden. Zusätze zu einer Suspension sollten in Abhängigkeit des Einflusses der Durchlässigkeit gewählt werden. Bei Böden, die eher undurchlässig sind, dominiert der Einfluss der Oberflächenspannung auf die Adhäsionsspannung. In dem Fall sollten Zusätze gewählt werden, welche die Oberflächenspannung herabsetzen. Bei vergleichsweise durchlässigen Böden, ist der Einsatz von Zusätzen, die aufgrund ihrer Ladung von Tonmineralen angezogen werden, wie z.B. einige Polymere, nicht zielführend.

Bei dem Einsatz von Zusätzen müssen umweltrechtliche Belange - vor allem für die Deponierung des Ausbruchmaterials - berücksichtigt werden.

12.4 Reagglomeration von gelöstem Boden

Probleme mit Verklebungen resultieren nicht allein direkt aus dem Anhaften von Böden an Werkstoffoberflächen, sondern auch aus dem Anhaften von bereits gelösten Bodenteilen untereinander. Bei dieser Reagglomeration bilden sich größere Bodenklumpen, die z.B. zum Verstopfen von Fließwegen führen können. Für den Prozess der Reagglomeration können die Überlegungen zum Anhaften der Böden an Werkstoffoberflächen übertragen werden, wobei das eine Bodenteil die Werkstoffoberfläche ersetzt. Es liegen dann zwei Haftpartner aneinander, von

jeder die Neigung besitzt, Wasser aus der Grenzfläche in seine Matrix einzubauen. Das bodenphysikalische Modell und die Überlegungen zur Vermeidung von Verklebungen – in diesen Fall zur Vermeidung der Reagglomeration - können hierauf angewendet werden.

12.5 Aspekte der Baugrunderkundung

Die Adhäsionsversuche sollten je Konsistenz mindestens drei Einzelversuche umfassen. Wenn die Untersuchungen für drei Konsistenzen mit jeweils drei Einzelversuchen durchgeführt werden, sind insgesamt neun Einzelversuche nötig. Für jeden Einzelversuch sind ca. 0,5 kg Probenmaterial (Trockenmasse) erforderlich. Das Probenmaterial kann für eine andere Versuchsreihe einmal wiederverwendet werden, so dass die gesamte Probenmenge im Mindestfall 2,25 kg beträgt. Für weitere Versuchsreihen ist entsprechend mehr Probenmaterial notwendig. Die Gewinnung ausreichenden Probenmaterials für Adhäsionsversuche ist bei der Planung der Baugrunderkundung, z.B. bei der Wahl der Anzahl und des Durchmessers von Kernbohrungen zu berücksichtigen.

Der Zeitaufwand für die Durchführung einer Versuchsreihe von neun Einzelversuchen an Böden beträgt einschließlich der Probenaufbereitung insgesamt etwa zwei bis drei Tage. Bei der Untersuchung von Tonsteinen ist die Probenaufbereitung aufwändiger, da der Tonstein vorher noch zerkleinert werden muss.

Für die Einschätzung der Adhäsionseigenschaften eines Bodens und die Planung der Adhäsionsversuche müssen im Rahmen der Baugrunderkundung zusätzlich die Plastizität des Bodens, die vorkommenden Konsistenzen sowie die mineralogische Zusammensetzung festgestellt werden. Diese sind im Regelfall bei solchen Projekten Standarduntersuchungen, so dass dadurch kein zusätzlicher Aufwand entsteht.

13 Ausblick

Mit dem vorgestellten Adhäsionsversuch steht ein Verfahren zur Einschätzung des Verklebungspotenzials von Böden zur Verfügung. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse ist bei entsprechend sorgfältiger Probenvorbereitung und Probeneinbau innerhalb einer akzeptablen Abweichung gewährleistet. Das Versuchsverfahren ist vergleichsweise einfach und schnell durchführbar, welches eine Voraussetzung für eine standardisierte Anwendung ist. Außer dem Adhäsionsmessgerät und der Standardausstattung für Proctorversuche ist eine Prüfpresse erforderlich, die für Druck- und Zugversuche eingerichtet ist. Prüfpresen, die nur für Druckprüfungen ausgelegt sind, können i.d.R. mit geringem Aufwand auch für Zugprüfungen modifiziert werden.

Der Adhäsionsversuch sollte daher zukünftig bei allen Vortrieben in bindigen Böden, die zunächst als potenziell verklebungsfähig gelten können, als Standardversuch im Rahmen der Baugrunderkundung durchgeführt werden. Dadurch können Erfahrungen im Hinblick auf die Einschätzung des Verklebungspotenzials bzw. der daraus abzuleitenden Maßnahmen gewonnen werden. Die Untersuchungen müssen dabei auch bei Vortrieben in veränderlichen Ton- oder Schluffsteinen durchgeführt werden.

Aus den Erfahrungen können dann die Grenzen der Verklebungspotenziale abgeleitet werden. Damit könnten dann Böden für Ausschreibung und Vergabe hinsichtlich des Verklebungspotenzials klassifiziert werden.

Zum weiteren Verständnis des Adhäsionsverhaltens sollte das bodenphysikalische Adhäsionsmodell durch numerische Modellierung des Wassertransportes untermauert werden. Dazu sind weitere Adhäsionsversuchsreihen mit gleichzeitiger Messung des Porenwasserdruckes erforderlich.

Da das Konsolidationsverhalten insbesondere bei gering plastischen Böden einen erheblichen Einfluss auf das Adhäsionsverhalten hat, sollte das Modell um diesen Aspekt erweitert werden. Dazu muss zusätzlich das Spannungs-Dehnungsverhalten des Bodens untersucht werden. Bei Adhäsionsversuchen ist die Verformung der Probenoberfläche zu messen.

Literaturverzeichnis

- 1 Adachi, K.; Fukue, M.:
Clay Science for engineering. Proceedings of the international symposium on suction, swelling, permeability and structure of clays, Shizuoka, Japan, 11. – 13.01.2001
- 2 von Ameln, D.; Bayer, H.-J.; Lenz, J.; Wegener, T.:
Bohrspülungen im HDD. Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2003
- 3 Atterberg, A.:
Die Plastizität der Tone. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde, Band 1, S 10 - 43, 1911
- 4 Beretitsch, S.:
Kräftespiel im System Schneidwerkzeug-Boden, Forschungsbericht des Institutes für Maschinenwesen im Baubetrieb, Reihe F, Heft 41, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1992
- 5 Breuer, Barbara:
Adhäsionseigenschaften von Tonsteinen des Stuttgarter Jura. Studienarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften, FG Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor, TU Darmstadt, Juli 2009
- 6 Bordachard, F. ; Roges, J. M.:
Maitrise du confinement et creusement à la mousse dans l'argile des Flandres. Tunnels et ouvrages souterrain, N° 136, Juillet/Août 1996, p. 207 - 211
- 7 O'Brian, W. J.; Hermann, J. J.:
The Strength of Liquid Bridges Between Dissimilar Materials. Journal of Adhesion, Vol. 5, 1973, S. 91 – 103
- 8 Burbaum, U.; Sass, I.:
Quantifizierung der Adhäsionsspannungen bindiger Böden für maschinelle Tunnelvortriebe. Vorträge der 30. Baugrundtagung 25.-27.09.2008 in Dortmund
- 9 Burbaum, U.; Sass, I.:
Verfahren zur Bestimmung der Adhäsionseigenschaften bindiger Böden als Grundlage zur Einschätzung des Verklebungsrisikos bei maschinellen Tunnelvortrieben. 15. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 13. März 2008

- 10 Burger, W.:
Schneidräder für Lockergestein: Prinzipien und Auslegungsaspekte. Tunnel, 2/2006,
S. 8 – 19
- 11 Chen, W. Z.; Hosney, R. C.:
Development of an Objective Method for Dough Stickiness. Lebensmittelwissenschaft
und -technologie, 28, 1995, S. 467 - 473
- 12 Czichos, H.; Habig, K.-H.:
Tribologie-Handbuch. Vieweg-Verlag, 2. Auflage, Wiesbaden 2003
- 13 Deecke, N.:
Adhäsionsuntersuchungen am Lauenburger Ton, Studienarbeit, Institut für
Angewandte Geowissenschaften. FG Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor,
TU Darmstadt, Juli 2008
- 14 DIN 4022: Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Ausgabe September
1987
- 15 DIN ISO 4287:
Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit:
Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der
Oberflächenbeschaffenheit, Ausgabe Oktober 1998
- 16 DIN 18121: Wassergehalt, April 1998
- 17 DIN 18122: Zustandsgrenzen, Teil 1 und Teil 2, Ausgabe Juli 1997
- 18 DIN 18123: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Ausgabe November 1996
- 19 DIN 18124: Bestimmung der Korndichte, Ausgabe Juli 1997
- 20 DIN 18127: Proctorversuch, Ausgabe November 1997
- 21 DIN 18128: Bestimmung des Glühverlustes, Ausgabe November 1990
- 22 DIN 18129: Kalkgehaltsbestimmung, Ausgabe November 1996
- 23 DIN 18130: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Ausgabe Mai 1998
- 24 DIN 18132: Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens, Ausgabe Dezember 1995

- 25 DIN 18137: Bestimmung der Scherfestigkeit, Ausgabe Dezember 1990

- 26 DIN 18196: Erd- und Grundbau: Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Ausgabe Oktober 1988

- 27 DIN 19683 (ehem.):
Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau: Physikalische Bodenuntersuchungen, Bestimmung der Adhäsion, ehemalige Ausgabe April 1973, vom Normenausschuß zurückgezogen

- 28 Dubbin, W.E. et al.:
Environmental Mineralogy: Microbial Interactions, Anthropogenic Influences, Contaminated Land and Waste Management. London, Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 2000

- 29 Dreher, K.:
Versuche und Betrachtung der praktischen Bedeutung der Adhäsion zwischen Tonböden und Stahl. Diplomarbeit, Institut für Grundbau und Bodenmechanik des Fachbereiches Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Berlin, August 1996

- 30 Egli, H.; Langmaack, L.:
Erddruckgestützter Schildvortrieb Chancen und Risiken. Felsbau, 2008, Heft 3, SS. 149 – 154

- 31 Fiedler, H.:
Untersuchung der Korrelation von Adhäsion und Permeabilität an Tonböden. Studienarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor, TU Darmstadt, Juli 2009

- 32 Fountaine, E. R.:
Investigations into the mechanism of soil adhesion. Journal of soil sciences, Vol. 5, No. 2, 1954, S. 251 - 263.

- 33 Geppert, J.:
Weiterführende Untersuchungen der experimentellen Ablidungdes Adhäsionsverhaltens zwischen Boden und Vortriebsmaschinen des Tunnelbaus, Institut für Grundbau und Baubetrieb, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik des Fachbereiches 9, Bauingenieurwesen, TU Berlin, Diplomarbeit, Februar 1999

- 34 Gillott, Jack, E.:
Clay in Engineering Geology. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New Yorck, 1968

- 35 Gouy, M.:
Charge électrique a la surface d'un électrolyte. Journal de Physique, 4^e série, t. IX,
Juni 1910
- 36 Grim, R. E.; Bray, R. H. Bradley, W.F.:
The mica in argillaceous sediments, Am. Min. 22
- 37 Grote, K.-H.; Feldhusen, J.:
Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, 22. Auflage, Berlin,
Heidelberg, New Yorck, 2007
- 38 Guillaume, J.; Mauroy, F.:
Examples of tunnel boring machine excavation fort he Lille Metro. Comparison
between the "Slurry Shield" an "Earth Pressure Balanced Shield" methods. Tunnel for
People, Golser, Hinkel, Schuber, Balkema, Rotterdam, 1997, SS 541 – 545
- 39 Habenicht, G. :
Kleben. Springer Verlag, 5. Auflage, Berlin, Heidelberg 2006
- 40 Hammound, F.; Boumekik, A.:
Experimental study of the behaviour of interfacial shearing between cohesive soils an
solid materials at large displacement. Asian Journal of civil engineering (building and
housing), Vol. 7, No. 1, 2006, pp 63 - 79
- 41 Hartge, K. H.; Horn, R.:
Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag, 3. Auflage, Stuttgart, 1999
- 42 Hartwig, U.:
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Einfluss der
Belastungsgeschichte auf die Horizontalspannungen in überkonsolidierten Tonen.
Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für
Bauingenieurwesen, Aachen, 2000
- 43 van Hees, R. C.:
Versuche und theoretische Betrachtungen zum Adhäsionsverhalten zwischen
Tonböden und Stahl. Institut für Grundbau und Bodenmechanik des Fachbereiches
Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Berlin, Mai 1995
- 44 Heim, D.:
Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. Enke-
Verlag Stuttgart, 1990

- 45 Hempel, D.:
Laborversuch zur Bestimmung des Adhäsionsverhaltens bindiger Böden. Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor, TU Darmstadt, Februar 2008

- 46 Hendrick, J.G.; Bailey, A.:
Determining Components of Soil-Metal Sliding Resistance. Transactions of the ASAE, 1982

- 47 Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.:
Physik für Ingenieure. VDI-Verlag, 2. Aufl., Düsseldorf 1989

- 48 Hofmann, H.:
Einfluss konzentrierter Salzlösungen auf die physiko-chemischen Eigenschaften quellfähiger Tonminerale: Konsequenzen für den Einsatz von Bentonit als Versatzmaterial in einem Endlager für schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in Salzformationen. Dissertation, Heidelberg, 2003

- 49 Hollinderbäumer, E. W. & Hoberg, H.:
Anbackungen feuchter Schüttgüter - Haftkraftmechanismen und Lösungsmöglichkeiten für praktische Probleme. Aufbereitungstechnik 35, 1994, Nr. 5, SS 233 - 240

- 50 Hornung, J.; Aigner, T.:
Reservoir-characterisation and -architecture of an alluvial plain: An outcrop-analogue study (SW-Germany, Stubensandstein, Upper Triassic).
In: Hüssner, H.; Hinderer, M.; Götz, A.; Petschick, R. (Eds.). Schriftenreihe der DGG, Sediment 2002, Heft 17, S. 93-94, 2002

- 51 Hug, C.:
Grundlegende Untersuchungen und methodische Arbeiten zum Adhäsionsverhalten bindiger Böden. Studienarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor, TU Darmstadt, Dezember 2006

- 52 International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on standardization of laboratory and field tests:
Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, part 2:
Suggested method for determining indirect tensile strength by the brazil test.
International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanics, Pergamon Press, Vol. 15, pp. 99-103, 1978

- 53 Jancsecz, S.:
Definition geotechnischer Parameter für den Einsatz von Schildvortriebsmaschinen mit suspensionsgestützter Ortsbrust. Forschung und Praxis 34 (Vorträge der STUVA-Tagung), 1991, SS. 34 – 40
- 54 Jaritz, R.:
Quantifizierung der Heterogenität einer Sandsteinmatrix (Mittlerer Keuper, Württemberg). Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), Reihe C, Nr. 48, 1999
- 55 Jasmund, K.; Lagaly, G.:
Tone und Tonminerale, Steinkopff-Verlag, Darmstadt 1993
- 56 Kézdi, Á.:
Handbuch der Bodenmechanik, Band 1: Bodenphysik. VEB Verlag für das Bauwesen, Berlin / Akadémiai Kiadó, Budapest, 1969
- 57 Katzuyuki, H.; Kazuo, T.; Koichi, I.:
The Capillary Binding Force of a liquid bridge. Powder Technology, 10, 1974, SS. 321 – 242
- 58 Koller, J.; Baumer, U.; Mania, D.:
High-Tech in the Middle Palaeolithic: Neandertal-Manufactured Pitch identified. Europea Journal of Archaeology, 2001, Nr. 4,
- 59 Kooistra, A.:
Verkleaving van kleien in tunnelboormachines. Master Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section Engineering Geology, 1998
- 60 Koorevaar, P.; Menelik, G.; Dirksen, C.:
Elements of soil physics. Elsevier Verlag, Amsterdam, 3. Auflage, 1983
- 61 Kowalew, W.:
Adhäsion von Tonböden. Studienarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften, FG Ingenieurgeologie und Geothermisches Labor, TU Darmstadt, Juli 2008
- 62 Kühn, G.:
Boden – eine Flüssigkeit? BMT 3, 6/1990, S 129 – 137
- 63 Kühn, G.:
Gestaltung von Grabgefäßen bei Hydraulikbaggern und Radladern. BMT 1, 2/1989, S 9 - 17

- 64 Lagaly, G.; Schulz, O.; Zimehl, R.:
Dispersionen und Emulsionen: eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale. Steinkopff-Verlag, Darmstadt 1997
- 65 Littleton, I.:
An experimental study of adhesion between clay and steel. Journal of terramechanics, Vol. 13, No. 3, S 141 – 512, 1976
- 66 Ludwig, S.:
Frostgefährdung toniger Deponiebarrieren, Gefrierverhalten, bodenmechanische Eigenschaften, Mikrogefüge. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Nr. 26, Karlsruhe, 1993
- 67 Luesse, C. H.:
B 437 Weserquerung und Wesertunnel, Besonderheiten und Erfahrungen. Bauingenieur, Band 79, Juni 2004, S. 272 - 279
- 68 Luesse, C. H.:
Wesertunnel: Hydroschildvortrieb in inhomogenen, weichen Böden. Tunnel 8/99, S. 37 - 46
- 69 Naidich, Y. V.; Lavrinenko, I. A.:
Capillary adhesion forces between solid particles with an intermediate liquid layer at the contact. Poroshkovaya Metallurgica, No. 10 (34), 1965, S. 831 – 834
- 70 Nichols, M. L.:
The Sliding of Metal Over Soil. Agricultural Engineering, Vol. 6, No. 4, April 1925, S. 80 - 84
- 71 Nichols, M. L.:
Dynamic Properties of Soil Affecting implement Design. Agricultural Engineering, Vol. 11, No. 6, June 1930, S. 201 - 204
- 72 Nichols, M. L.; Bayer, L. D.:
An Interpretation of the Physical Properties of Soil Affecting Tillage and implement Design by Means of the Atterberg Consistency Constants. International Congress of Soil Science, Band 2, 1930, S. 175 - 188
- 73 Okrusch, M., Matthes, S.:
Mineralogie. 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005

- 74 Parker, A.; Rae, J. E.:
Environmental interactions of clays. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998
- 75 Polke, R.; Krupp, H.; Rumpf, H.:
Einflüsse auf die Adhäsion von Feststoffteilchen. Chemie, physikalische Chemie und Anwendungstechnik der grenzflächenaktiven Stoffe, München, 1973
- 76 Potyondy, J. G.:
Skin friction between various soils and construction materials. Géotechnique, Volume XI, The Institute of civil engineers, London, 1961
- 77 Riek, H. G.:
Untersuchungen über die Adhäsion zwischen Boden und festen Werkstoffen. Arbeiten der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim, Heft 18, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1963
- 78 Rumpf, H.:
Grundlagen und Methoden des Granulierens. Chemie Ingenieur Technik, 30. Jahrgang 1958, Nr. 3, S. 144 - 158
- 79 Rumpf, H.:
Die Wissenschaft des Agglomerierens. Chemie Ingenieur Technik, 48. Jahrgang 1974, Nr. 1, S. 1 - 46
- 80 Rumpf, H.; Pietsch, W.:
Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln. Chemie Ingenieur Technik, 39. Jahrgang 1967, Heft 15, S. 885 - 893
- 81 Rumpf, H.; Schubert, H.:
Adhesion Forces in Agglomeration Processes, Ceramic Processing before Firing. Chapter 27, Jon Wiley & Sons, New York, 1978, S. 357 - 376
- 82 Sass, I., Burbaum, U.:
A method for the measurement of adhesive properties of cohesive soils. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, DOI 10.1007/s10064-008-0178-6,
Received: 21 December 2007 / Accepted: 23 August 2008, Springer-Verlag 2008

- 83 Savidis, S. :
Sonderkonstruktionen von Gründungen und Stützbauwerken. Skriptentwurf,
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Stand
2005
- 84 Schachbasian; J.:
Physik des Bodens: Untersuchungen über die Adhäsion und die Reibung der
Bodenarten an Holz und Eisen. Mitteilungen aus dem agrikulturphysikalischen
Laboratorium und Versuchsfelde der technischen Hochschule in München, Band 13,
Seiten 193-225, Heidelberg, 1890
- 85 Scheffer, F.; Schachtschnabel, P.:
Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 14. Auflage, 1998
- 86 Schick, P.:
Ein quantitatives Zwei-Komponenten-Modell der Porenwasser-Bindekräfte in
teilgesättigten Böden. Habilitationsschrift, Mitteilungen des Institutes für
Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr München, Heft 17, 2003
- 87 Schick, P.:
Spaltzugversuche mit kohäsiven Böden. Bautechnik 82, 2005, Heft 2, S. 90 – 104
- 88 Schlick, G.:
Adhäsion im Boden - Werkzeug – System. Forschungsbericht des Institutes für
Maschinenwesen im Baubetrieb, Reihe F, Heft 39, Universität Karlsruhe, Karlsruhe,
1989
- 89 Schubert, H.:
Untersuchungen zur Ermittlung von Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten
Haufwerken aus körnigen Stoffen. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät für
Chemieingenieurwesen, 1972
- 90 Schütz, W.:
Haftung von Feststoffpartikeln an Festkörperoberflächen in gasförmiger Umgebung.
Einfluss von Anpresskräften und der Umgebungsfeuchte. Dissertation, Universität
Karlsruhe, Fakultät für Chemieingenieurwesen, 1979
- 91 Schumacher, L.:
Leistungsanalyse an Großlochdrehbohrgeräten. Wissensportal Baumaschine.de
3, 2004

- 92 Skempton, A. W.:
The Colloidal „Activity“ of Clays. Proceedings 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), 1953, Vol. 1, pp. 57 – 61
- 93 Söhne, W.:
Reibung und Kohäsion bei Ackerböden. Grundlagen der Landtechnik, Heft 5, 1953
- 94 von Soos, P.:
Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor. in: Grundbau-Taschenbuch, Ernst & Sohn Verlag Berlin, Band 1, 6. Auflage, 2001
- 95 Stafford, J.V.; Tanner, D.W.:
Die Reibungscharakteristik des Gleitens von Stahl gegen Boden. Journal of Soil Science 28, Nr. 4, 1997
- 96 Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR:
Erdgastransportleitung Rysum-Midwolda, Tunnelstrecke zwischen Delfzijl (NL) und Knock (D), 1. Bericht, Geotechnisches Gutachten, Vorabzug, 29.02.2008 (nicht veröffentlicht)
- 97 Stern, O.:
Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht. Zeitschrift für die Elektrochemie, Bd. 30, 1924, S. 508 – 516
- 98 Strauss, H.; Schroeder, U.; Piatczak, K.:
Shale –Inhibiting Fluids for HDD applications. Vortrag (bisher unveröffentlicht), 2009
- 99 Subba Rao, K.S.; Allam, M.M.; Robinson, R.G.:
An Apparatus for Evaluating Adhesion between Soils and Solid surfaces. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 30, No. 1, Jan. 2002, pp 27-36
- 100 Terzaghi, K.; Peck, R. B.:
Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1961
- 101 Terzaghi, K.:
Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Franz Deuticke Verlag, Leipzig und Wien, 1925

- 102 Thewes, M.:
Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Berichte aus Grundbau und Bodenmechanik der Bergischen Universität Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Band 21, Wuppertal 1999, Shaker Verlag Aachen
- 103 Thewes, M.:
Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Geotechnik 26, 2003, Nr. 4
- 104 Weh, M.; Zwick, O.; Ziegler, M.:
Maschinenvortrieb in verklebungsanfälligem Baugrund. Teil 1 und 2, Tunnel 1/2009 (Teil 1), SS 25-36 und Tunnel 2/2009 (Teil2), SS 18 – 28
- 105 Wilms, J.:
Zum Einfluß der Eigenschaften des Stützmediums auf das Verschleißverhalten eines Erddruckschildes. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, Universität-Gesamthochschule Essen, 1995
- 106 Wolkewitz, H.:
Die physikalische Eigenschaften von Böden, ihre methodische Erfassung und ihre Veränderung durch verschiedene Faktoren, dargestellt an Modellschubstanzen. Habilitationsschrift, Fakultät für Landbau TU Berlin, 1964
- 107 Zimnik, A.R.:
The adherence of clay to steel surfaces. Master Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section Engineering Geology, 1999

Anhang A: Tone und Tonminerale

A.1 Abgrenzung

In der Bodenmechanik sind Tone definiert als klastische Sedimente mit einer Korngröße $d < 2\mu\text{m}$. Diese Größe ist historisch durch die technischen Grenzen der Mikroskope des 19. Jahrhunderts bedingt. Tone bestehen vorwiegend aus Tonmineralen sowie Körnern anderer Minerale entsprechend kleiner Korngröße. Tonminerale sind Phyllosilicate (Schichtsilicate) mit einem Durchmesser der Körner von meist $d < 2\mu\text{m}$ [Jasmund & Lagaly, 1993].

Tonminerale entstehen im Wesentlichen bei der Verwitterung von Silikatgesteinen [Jasmund & Lagaly, 1993]. Die bedeutendste Eigenschaft von Tonmineralen ist die Fähigkeit, Wasser in ihrer Kristallstruktur einzubauen oder an ihrer Oberfläche zu binden.

A.2 Komponenten der Tonminerale

Phyllo- bzw. Schichtsilicate sind aus Schichten aus zwei Komponenten aufgebaut [Jasmund & Lagaly, 1993, Gillott, 1968]:

- Schichten aus tetraedrisch angeordneten Silizium – Sauerstoff-Komplexen (sog. Tetraederschicht) und
- den Schichten aus oktaedrisch angeordneten Metall – Sauerstoff-Komplexen (sog. Oktaederschicht).

Die Art des Tonminerals und seine Eigenschaften hängen von der Kombination der Schichten und ihrer Zusammensetzung ab.

A.2.1 Tetraederschicht

Diese Komponente ist ein aus vier Sauerstoffatomen (O^{2-}) zusammengesetzter Tetraeder, in dessen Mitte im Regelfall ein Siliziumkation (Si^{4+}) angeordnet ist (Abb. A.1). Bei einem nur aus Siliziumionen aufgebauten Tetraeder handelt es sich um ein reines Silikat. Statt einem Siliziumkation kann sich dort auch ein dreiwertiges Aluminiumkation (Al^{3+}) befinden. Dann handelt es sich um ein Alumosilikat.

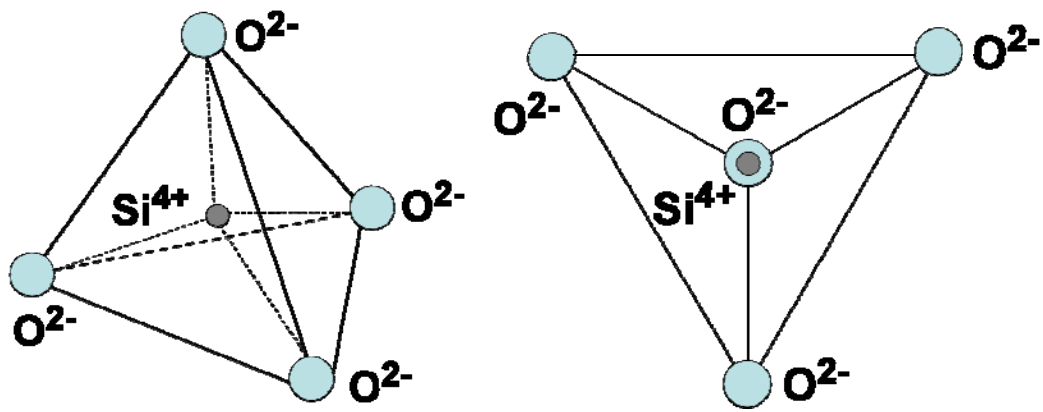


Abbildung A.1: Tetraeder-Modell und Draufsicht

Die Tetraeder sind über gemeinsame Sauerstoffionen so miteinander verbunden, dass deren freie Spitzen in eine Richtung zeigen. In der Ebene sind die Tetraeder zu einem Netzwerk aus Sechseringen (Abb. A.2) verknüpft (Abb. A.3). Die Verbindung der Tetraeder wird als T-Schicht bezeichnet.

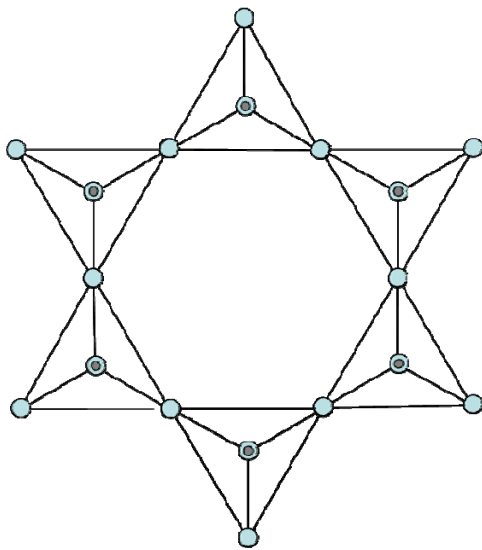


Abbildung A.2: Sechsering aus Tetraedern

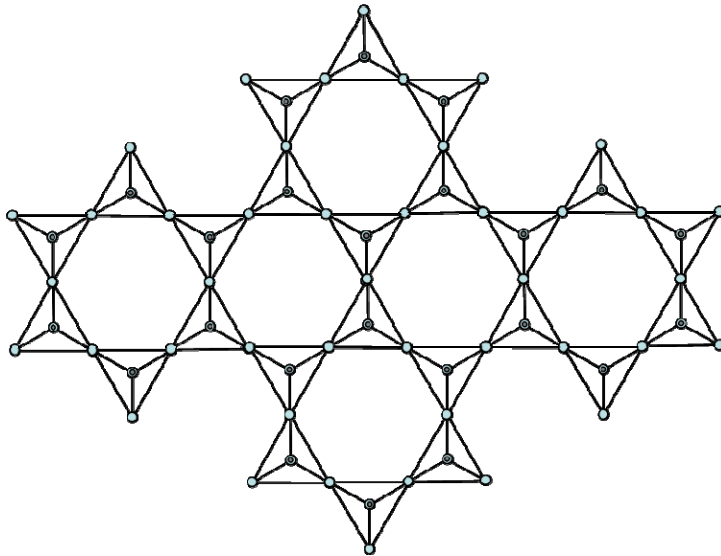


Abbildung A.3: Tetraeder-Netzwerk

In der Ebene teilen sich zwei Siliziumionen die Sauerstoffionen. Dadurch werden die Ladungen in der Ebene ausgeglichen. Das Sauerstoffion an der freien Spitze des Tetraeders verbindet sich mit der Oktaederschicht so, dass sich die Tetraeder- und die Oktaederschicht ein Sauerstoffion teilen.

Wird das Siliziumion durch ein Fremdion (Al^{3+}) substituiert, entsteht in der Tetraederschicht ein Ladungsdefizit, was zu einer negativen Gesamtladung des Tonminerals führt. Dies wird durch die Bindung von Kationen in der Zwischenschicht (s.u.) kompensiert.

A.2.2 Oktaederschicht

Die zweite Komponente ist eine Schicht aus Oktaedern. Die sechs Ecken der Oktaeder werden von Sauerstoffionen (O^{2-}) bzw. von Hydroxylgruppen (OH^-) gebildet (Abb. A.4). Diese umschließen bevorzugt drei- und zweiwertige Aluminium-, Eisen- oder Magnesiumionen (Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}).

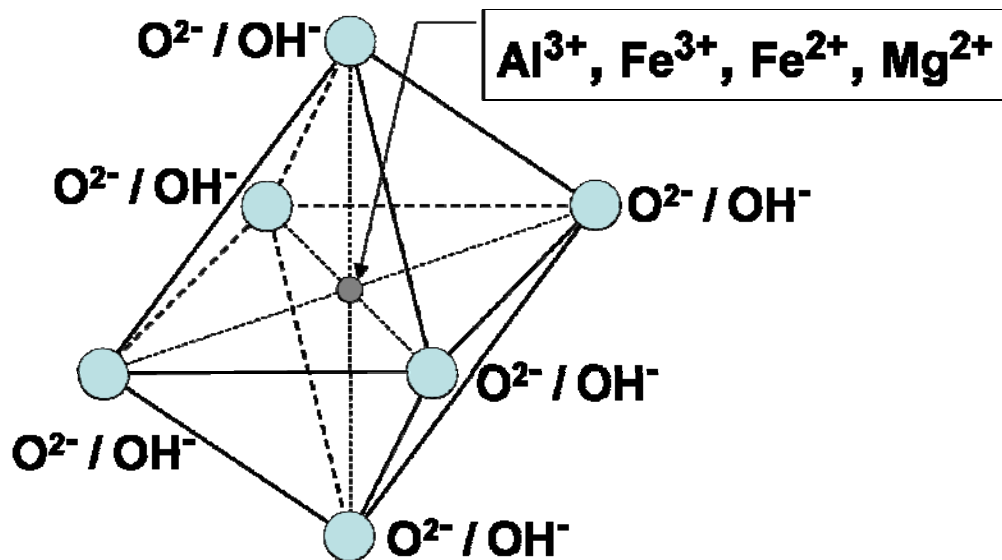


Abbildung A.4: Oktaeder

Die Oktaeder sind über ihre Kanten miteinander verknüpft und liegen mit zweien ihrer Dreiecksflächen parallel zur Ebene der Tetraeder. Sie bilden die Oktaederschicht (O-Schicht). Die an den Spitzen des Tetraeders befindlichen Sauerstoffionen bilden gleichzeitig die Sauerstoffionen des Oktaeders. Die Sauerstoffionen der Oktaederschicht, die nicht gleichzeitig zu einem Tetraeder gehören, binden ein Proton. Sie liegen daher als Hydroxidionen (OH^{-}) vor.

A.3 Bau der Tonminerale

Tonminerale bestehen aus Verknüpfungen der Tetraeder- mit den Oktaederschichten. Die Spitzen der Tetraeder sind dabei an die Oktaeder gebunden, von denen zwei Flächen jeweils parallel zur Ebene der Tetraederschicht liegen. (Abb. A.5).

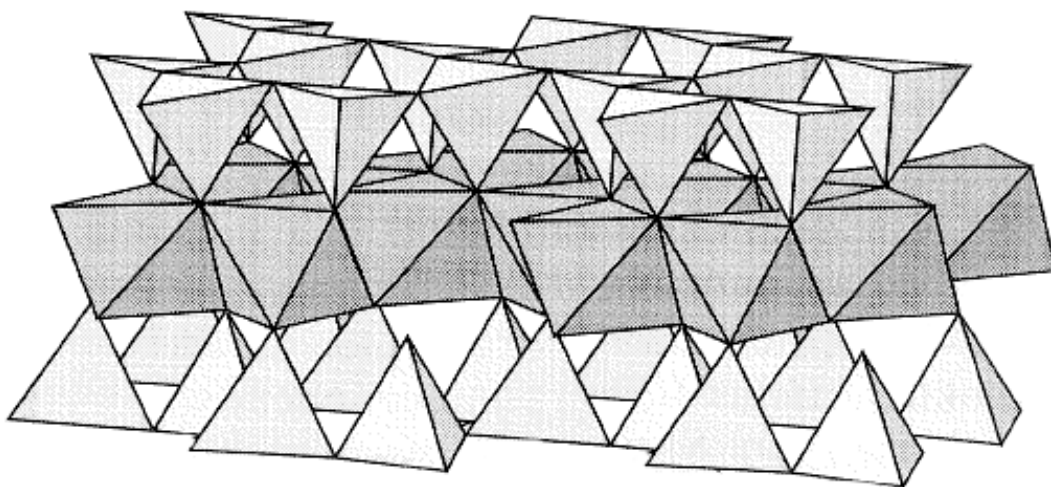


Abbildung A.5: Tetraeder-Oktaeder-Tetraeder-Schichtaufbau eines Smektit, verändert nach Scheffer & Schachtschnabel [1998]

Die Kombination der Tetraeder-Oktaederschichten bestimmt die Eigenschaften der Tonminerale. Es werden Zwei-, Drei- und Vierschichttonminerale unterschieden.

A.3.1 Zweischichttonminerale

Sind je eine Tetraeder- und eine Oktaederschicht miteinander verbunden (Abb. A.6), liegt ein Zweischichttonmineral vor. Diese Tonminerale werden auch als 1:1-Schichtsilikate oder 1:1-Tonmineral bezeichnet (Anordnung T-O). Die Bindung der (ungeladenen) Schichten beruht auf Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen und Van-der-Waals Kräften. Der Schichtabstand d_L der Zweischichttonminerale beträgt $0,7 - 0,73 \text{ nm}$ ($7,0 - 7,3 \text{ \AA}$).

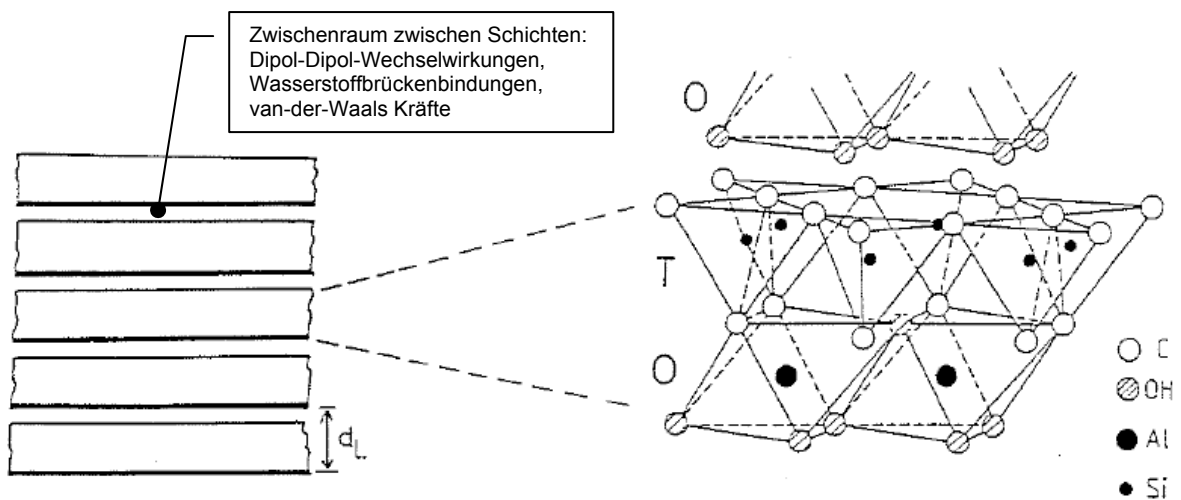


Abbildung A.6: Schichtmodell eines Zweischichttonminerals, verändert nach Jasmund & Lagaly [1993]

A.3.2 Dreischichttonminerale

Ist eine weitere Tetraederschicht an die Oktaederschicht kondensiert (Abb. A.7), handelt es sich um ein Dreischichttonmineral (oder ein 2:1-Schichtsilikat oder 2:1-Tonmineral, Anordnung : T-O-T). Die Spitzen dieser zweiten Tetraederschicht zeigen ebenfalls zur Oberfläche der Oktaederschicht, so dass sie entgegengesetzt zur ersten Tetraederschicht gerichtet sind. Die Oberflächen sind außer beim trioktaedrischen Talk und beim dioktaedrischen Pyrophyllit (s.u.) geladen. Diese Ladung entsteht, wenn in der Oktaederschicht [Jasmund & Lagaly, 1993]

- dreiwertige Metallionen durch zweiwertige ersetzt werden, oder
- zweiwertige Metallionen durch einwertige ersetzt werden.

Ladungen können außerdem durch Ersatz der Si^{4+} -Ionen in der Tetraederschicht durch Al^{3+} Ionen entstehen.

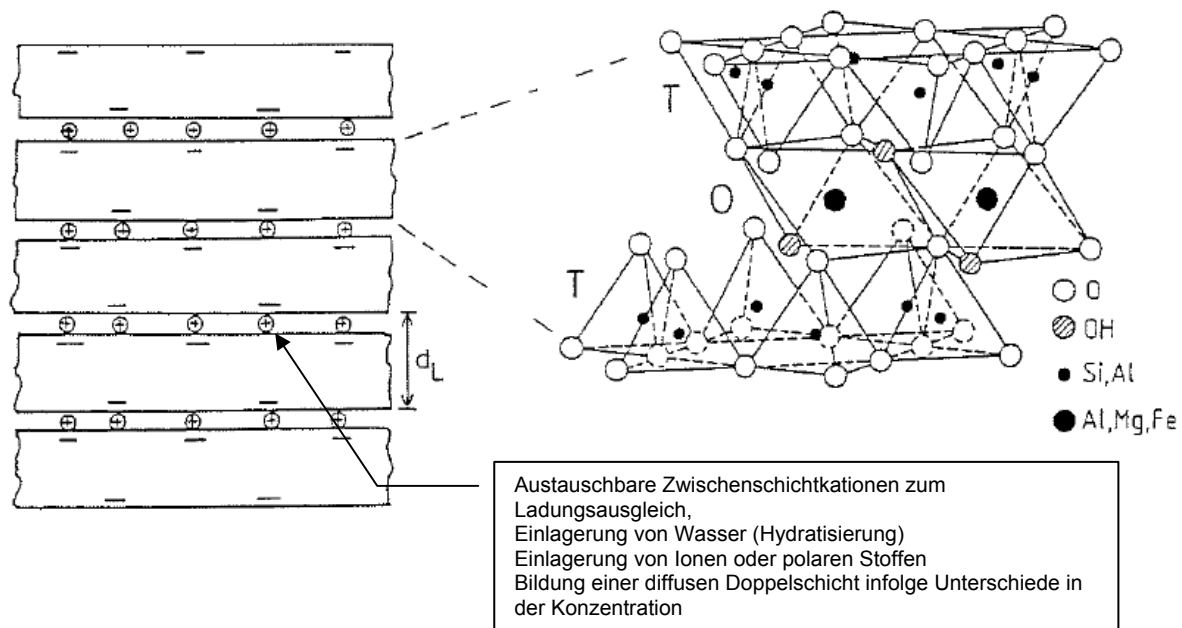


Abbildung A.7: Schichtmodell eines Dreischichttonminerals, verändert nach Jasmund & Lagaly [1993]

Zwischen den Schichten werden Kationen zum Ausgleich der negativen elektrostatisch geladenen Oberflächen benötigt. Die Höhe der Ladung und die Art der Kationen in den Zwischenschichten bestimmt die Art des Tonminerals [Scheffer & Schachtschnabel, 1998]. Die Bindungsenergie zwischen den Schichten ist sehr gering. An diese Kationen können daher in den Zwischenräumen leicht Wassermoleküle gebunden, d.h. eingelagert werden. Sind keine Wassermoleküle gebunden, beträgt der Schichtabstand $d_L \approx 1 \text{ nm}$ (10 \AA). Die Zwischenräume werden im bodenmechanischen Sinne nicht als Porenraum betrachtet [Schick, 2003].

A.3.3 Vierschichttonminerale

Sind anstelle der Zwischenschichtkationen Schichten aus Oktaedern eingelagert (Abb. A.8), spricht man auch von Vierschichttonmineralen (Anordnung: T-O-T-O). Diese Minerale werden als Chlorite bezeichnet. Diese Minerale werden in manchen Darstellungen wegen des Austauschs der Kationen durch die Oktaederschicht aber auch noch zu den Dreischichttonmineralen gezählt (z.B. in Jasmund & Lagaly, 1993). Der Schichtabstand bei diesen Mineralen beträgt ca. $1,4 \text{ nm}$ (14 \AA).

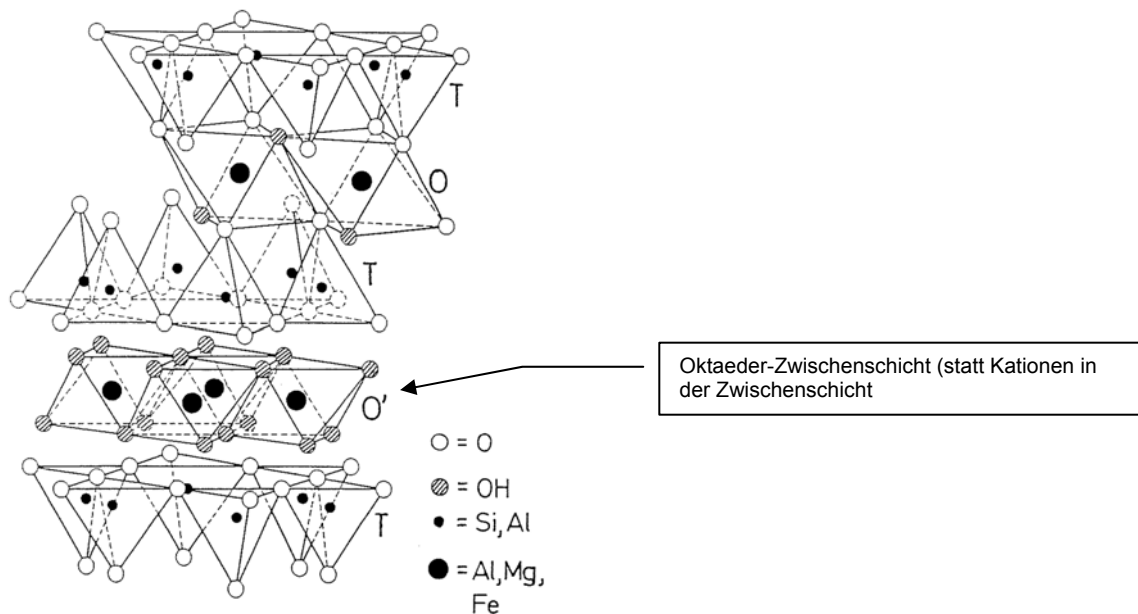


Abbildung A.8: Schichtmodell eines Vierschichttonminerals, verändert nach Jasmund & Lagaly [1993]

A.3.4 Wechsellagerungen

Wechsellagerungsminerale sind regelmäßig oder unregelmäßig angeordnete Schichten aus den beschriebenen Tonmineralen. Ein in der Bodenmechanik bedeutendes Wechsellagerungsmineral ist der Corrensit, der aus Chlorit und Vermiculit oder Smektit besteht und eine sehr hohe Quellfähigkeit aufweist [Jasmund & Lagaly, 1993].

A.4 Schichtstruktur der Tonminerale

Der Aufbau der Tonminerale aus diesen Tetraeder-Oktaederschichten führt zu blättchenförmigen Mineralen. Die Anzahl n der Schichten beträgt etwa zwischen $n = 5$ und 80 [Schick, 2003]. Die Dicke der Blättchen beträgt zwischen $d = 2$ nm bis 50 nm [Scheffer & Schachtschnabel 1998]. Der Durchmesser der Blättchen beträgt zwischen 30 nm und 5.000 nm ($5 \mu\text{m}$), in der Regel jedoch kleiner als 2.000 nm ($2 \mu\text{m}$). Bei Chloriten (s. u.) kann die Dicke bis 20.000 nm ($20 \mu\text{m}$) betragen [Schick, 2003].

In Abb. A.9 sind schematisch die aus mehreren Tetraeder-Oktaeder-Tetraederschichten aufgebauten Mineralkörner eines Kaolinit und eines Montmorillonits (s.u.) dargestellt.

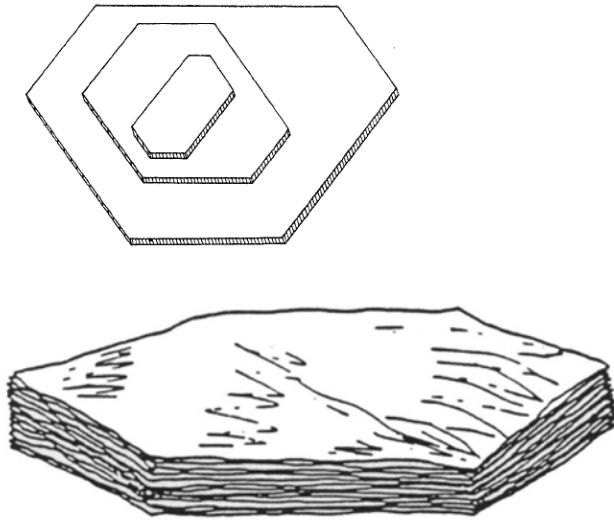


Abbildung A.9: Schematische Darstellung von Mineralkörnern eines Kaolinites [Kézdi, 1969], und eines Mineralkorn eines Montmorillonits [Savidis, 2005]

In Abb. A.10 ist eine ESEM Aufnahme eines montmorillonitreichen Tons dargestellt, in der man deutlich die blättchenartige Struktur der Minerale erkennt.

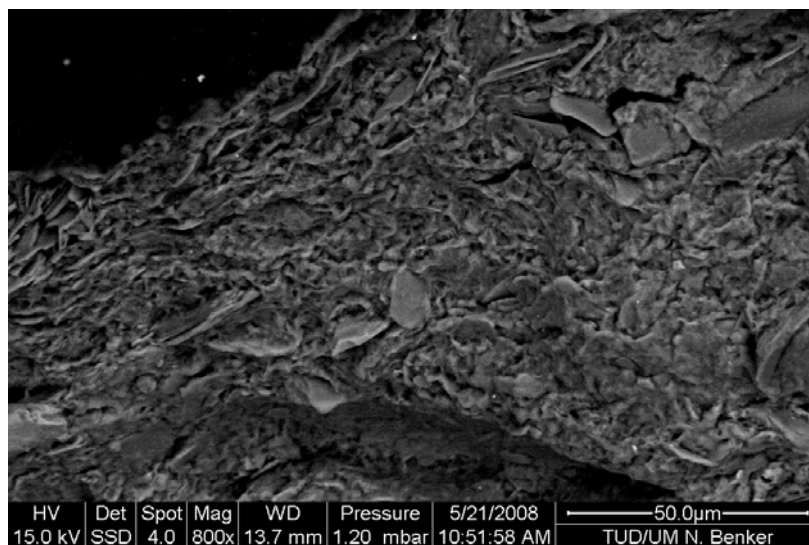


Abbildung A.10: ESEM-Aufnahme eines montmorillonitreichen Tons

A.5 Arten von Tonmineralen

Die Tonminerale werden nach Anordnung der Tetraeder-Oktaederschichten und der Schichtladung klassifiziert.

A.5.1 Zweischichttonminerale

Die Zweischichttonminerale umfassen folgende zwei Untergruppen [Jasmund & Lagaly, 1993]:

- Serpentinminerale
- Kaolinminerale

Kaolinminerale und Serpentinminerale kommen in der Natur i.d.R. nicht nebeneinander vor.

A.5.2 Dreischichttonminerale

Die Gruppe der Dreischichttonminerale umfasst folgende Gruppen [Jasmund & Lagaly, 1993]:

- Talk-Pyrophyllit-Gruppe
- Smectite
- Vermiculite
- Illite
- Glimmer
- Sprödglimmer
- Sepiolith-Palygorskit-Gruppe

A.5.3 Vierschichttonminerale

Die Gruppe der Vierschichttonminerale umfasst die Gruppe der Chlorite [Jasmund & Lagaly, 1993]

A.6 Ausgewählte Tonminerale

A.6.1 Kaolinit

Der Kaolinit ist der industriell bedeutendste Vertreter der Tonminerale der Kaolingruppe (Zweischichttonmineral). Kaolinit entsteht bei der Verwitterung der Feldspäte in feldspatführenden Silikatgesteinen. Der Schichtabstand d_L des Kaolinit beträgt 0,7 – 0,73 nm (7,0 – 7,3 Å). Neben dem Kaolinit kommt noch der Halloysit als der zweite Vertreter der Tone der Kaolingruppe vor. Dieser hat zwischen den Tetraeder-Oktaederschichten eine Wasserschicht angelagert und entsprechend einen Schichtabstand von 1 nm (10 Å).

A.6.2 Illit

Der Illit ist der häufigste Vertreter der Dreischichttonminerale. Zuerst wurde er in Tonschiefern aus Illinois genauer beschrieben [Grim et. al., 1937, zitiert in Jasmund & Lagaly, 1993]. Illite sind eng mit den Glimmern verwandt, aus dem Grunde wird er häufig als glimmerähnliches Tonmineral oder Hydroglimmer beschrieben. Die negative Schichtladung ist jedoch geringer als

bei diesen. Illite entstehen vorwiegend aus Smektiten durch den Einbau von Kalium zwischen den Schichten während der Diagenese von Sedimenten [Scheffer & Schachtschnabel, 1998]. Bei unvollständiger Alteration ist ein Teil des Kristalls (der Zwischenschichten) meist noch smektitisch und damit aufweitbar, also quellfähig [Jasmund & Lagaly, 1993, Scheffer & Schachtschnabel, 1998]. Eine unvollständige Alteration ist in der Natur häufig anzutreffen. Der Illit ist somit meist sehr heterogen. Die Illite erscheinen daher als unregelmäßig begrenzte Blättchen. Die Kristalle sind häufig aus nur 10 bis 30 Silikatschichten aufgebaut. Die Dicke der Kristalle beträgt ca. 0,1 – 0,3 μm .

A.6.3 Smektit

Die Smektite sind aus geotechnischer Sicht die interessanteste Gruppe der Dreischichttonminerale. Infolge der geringen Schichtladung können sehr leicht polare Stoffe, wie z.B. Wassermoleküle in die Zwischenschichten eingelagert werden. Smektite können daher als sehr reaktiv bezeichnet werden. Smektite sind dadurch oft hoch quellfähig.

Montmorillonit als der häufigste Vertreter des dioktaederischen Smektit entsteht durch Verwitterung vulkanischer Tuffe und Aschen sowie durch hydrothermale Alteration in Vulkangebieten. Andere Vertreter der dioktaedrischen Smektite sind Nontronit und Beidellit. Trioktaedrische Smektite wie der Saponit und der Hectorit sind vergleichsweise selten anzutreffen.

A.6.4 Vermicullit

Der Vermicullit ist mit dem Smektit verwandt. Er unterscheidet sich von diesem im Wesentlichen durch die Höhe seiner Schichtladung. Minerale mit einer Schichtladungen von $\xi = 0,6 - 0,9$ je Formeleinheit werden als Vermicullite, zwischen $\xi = 0,25 - 0,6$ als Smektite bezeichnet [Gilliot, 1968, Hofmann, 2005]

Auch Vermicullite sind quellfähig, wegen ihrer höheren Schichtladung allerdings etwas geringer als Smektite.

A.6.5 Chlorit

Chlorit ist ein Vierschichttonmineral mit einer Oktaederschicht anstatt einer Zwischenschicht aus Kationen. Die Genese von Chloriten ist vielfältig. Es kommen sowohl tri- als auch dioktaedrische Minerale vor. Chlorite sind nicht quellfähig.

A.7 Oberflächenladung, Kantenladung und Kationenaustauschkapazität

A.7.1 Oberflächenladung und Kationenaustauschkapazität

Sind alle Tetraederzentren und alle Oktaederzentren so besetzt, dass sich die Ladungen ausgleichen, ist die Schichtladung $\xi = 0$. Dies trifft z.B. bei den Zweischichttonmineralen und dem Talk als Dreischichttonmineral im Idealfall zu. In der Natur sind häufig nicht alle Tetraeder- und/oder Oktaederzentren besetzt oder nicht mit den Kationen mit der jeweils notwendigen Wertigkeit besetzt. Es herrscht ein Ladungsdefizit, so dass die Oberflächen negativ elektrostatisch geladen sind. Die Schichtladung gibt daher Aufschluss über den Ersatz von Tetraeder- und/oder Oktaederzentren mit Kationen geringer Wertigkeit durch Kationen höherer Wertigkeit. Das Ladungsdefizit wird durch Bindung von Kationen an den Oberflächen der Schichten ausgeglichen.

Die Höhe der Ladung und die Art der Kationen in den Zwischenschichten bestimmt die Art des Tonminerales [Scheffer & Schachtschnabel, 1998]. An diese Kationen können in den Zwischenräumen leicht polare Stoffe, wie z.B. Wassermoleküle gebunden (eingelagert) werden.

Die Zwischenschichtkationen können gegen andere Kationen entsprechend der Wertigkeit ausgetauscht werden. Die Menge der austauschbaren Zwischenschichtkationen ist nur durch die Schichtladung festgelegt. Sie ist unabhängig vom pH-Wert.

Sowohl die Fähigkeit, Kationen auszutauschen als auch deren Menge wird durch die Kationenaustauschkapazität (KAK) beschrieben. Die Kapazität, Kationen auszutauschen steigt allerdings nicht mit zunehmender Schichtladung. Sie erreicht vielmehr bei einer Schichtladung von $\xi = 0,6$ ein Maximum. Bei höheren Schichtladungen ist die Kationenaustauschkapazität wieder geringer, da die Kationen im Zwischenschichtraum durch die höhere Schichtladung so fest gebunden sind, dass sie schwerer ausgetauscht werden können [Jasmund & Lagaly, 1993]. Der Zusammenhang zwischen Schichtladung und Kationenaustauschkapazität (KAK) ist in Abb. A.11 dargestellt.

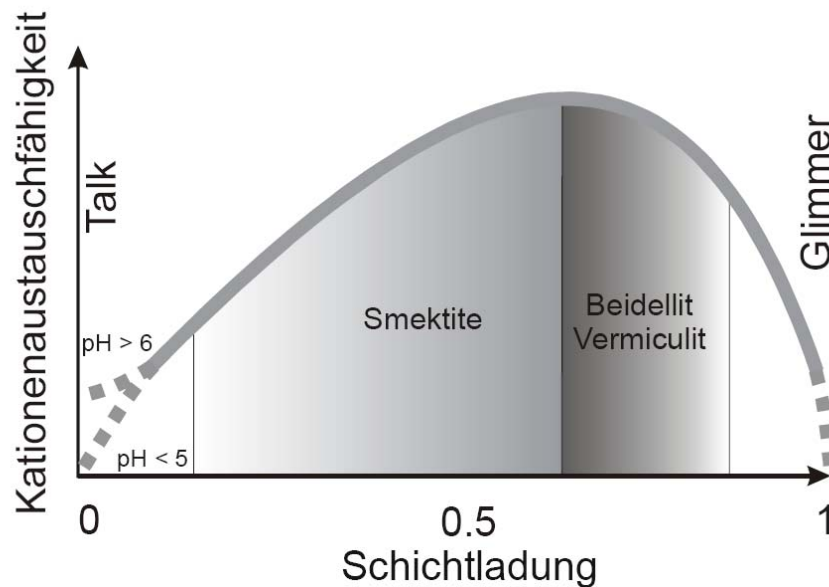


Abbildung A.11: Zusammenhang zwischen Schichtladung und Kationenaustauschkapazität [Hofmann, 2003]

A.7.2 Kantenladung

Außer durch die negative elektrostatische Ladung der Oberflächen der Schichten können Kationen (und auch Anionen) an den Kanten der Minerale gebunden werden, die durch die fehlenden Fortsetzungen der Tetraeder- / Oktaederschichten geladen sind. Die Ladung der Kanten wird vom pH-Wert der Umgebung der Kanten gesteuert und ist daher variabel. In saurem Milieu (pH-Wert < 5-6) sind die Kanten positiv geladen, es werden Anionen zum Ausgleich der Ladung angelagert. Mit steigendem pH-Wert nimmt die Dichte der positiven Ladungen ab, so dass die Ränder umgeladen werden. In leicht saurer bis neutraler Umgebung sind die Kanten ungeladen. Bei basischen Verhältnissen sind die Kanten negativ geladen. In diesem Fall werden wie an der Oberfläche der Schichten Kationen angelagert [Jasmund & Lagaly, 1993].

Bei Smektiten können ab einem pH-Wert = 7 an den Kanten ca. 20 % der maximal austauschbaren Kationen angelagert werden [Jasmund & Lagaly, 1993]. Die Schichtladung steuert in diesem Fall ca. 80 % der austauschbaren Kationen.

In Tabelle A.1 ist die Kationenaustauschkapazität verschiedener Tonminerale zusammengestellt [Jasmund & Lagaly 1993, von Soos 2001, Heim, 1990].

Tabelle A.1: Schichtladung und Kationenaustauschkapazität ausgewählter Tonminerale

Tonmineral	Schichtladung pro Formeleinheit [-]	Kationenaustauschkapazität	
		Zwischenschichtraum [meq/100g]	Gesamt [meq/100g]
Kaolinit	Keine ¹⁾	Keine ¹⁾	1 – 10 ¹⁾
	k.A. ²⁾	k.A. ²⁾	3 – 15 ²⁾
	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾	3 – 15 ³⁾
Illit	0,60 – 0,90 ¹⁾	160 - 230 ¹⁾	< 35 ¹⁾
	k.A. ²⁾	k.A. ²⁾	10 - 40 ²⁾
	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾	20 – 50 ³⁾
Smektit (Montmorillonit)	0,25 – 0,40 ¹⁾	70 - 110 ¹⁾	70 - 120 ¹⁾
	k.A. ²⁾	k.A. ²⁾	80 - 150 ²⁾
	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾	70 - 130 ³⁾
Vermiculit	0,50 – 0,80 ¹⁾	130 - 210 ¹⁾	130 – 210 ¹⁾
	k.A. ²⁾	k.A. ²⁾	k.A. ²⁾
	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾	150 - 200 ³⁾
Chlorit	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾
	k.A. ²⁾	k.A. ²⁾	10 - 40 ²⁾
	k.A. ³⁾	k.A. ³⁾	10 – 40 ³⁾

¹⁾ [Jasmund & Lagaly, 1993] ²⁾ [von Soos, 2001] ³⁾ [Heim, 1990]

k.A.: keine Angabe

A.7.3 Selektivität des Kationenaustausches

Die Kationen werden selektiv ausgetauscht, d.h. in der Regel werden höherwertige Kationen gegen Kationen geringerer Wertigkeit aus dem Zwischenschichtraum ausgetauscht, d.h. die höherwertigen Kationen verdrängen die geringerwertigen Kationen. Allerdings werden auch, unabhängig von der Wertigkeit, solche Kationen bevorzugt, die aufgrund ihrer Ionenradien besser in die Räume innerhalb der Tetraederschichten passen. Kalium⁺ oder NH⁴⁺ -Ionen passen sehr gut in diese Zwickel hinein und werden deshalb meist bevorzugt ausgetauscht [Jasmund & Lagaly, 1993]

A.8 Wasseraufnahme

A.8.1 Vereinfachte Darstellung der Wasserbindung

Die Oberflächen der Tonminerale sind negativ geladen, die Kanten abhängig vom pH-Wert der Umgebung positiv oder negativ geladen. Zum Ausgleich der Ladung werden Kationen an den

jeweiligen Oberflächen gebunden (bei positiver Ladung der Kanten werden dort Anionen gebunden).

Aufgrund des Dipolcharakters des Wassermoleküls können Wassermoleküle an den Kationen an der Oberfläche der Tonminerale (wie auch anderer Mineralkörner) adsorbiert werden. Wassermoleküle werden aufgrund der Polarität der Wassermoleküle gegenüber Gasmolekülen bevorzugt adsorbiert [Scheffer & Schachtschnabel, 1998]. Dabei wirken nach Schick [2003]:

- van-der-Waals-Kräfte
- Ion-Dipol-Wechselwirkungen,
- Dipol-Dipol-Wechselwirkungen,
- Wasserstoffbrückenbindungen,
- Dispersionswechselwirkungen.

Die Bindung der (ersten) Molekülschicht direkt an der Oberfläche ist sehr stark. Dies hat zur Folge, dass im chemischen Sinne vollkommen trockene Böden in der Natur i.d.R. nicht vorkommen. An der Oberfläche der Mineralkörner ist fast immer mindestens eine Schicht aus Wassermolekülen adsorbiert.

Auch die Kationen in den Zwischenschichten der Dreischichttonminerale können bei ausreichendem Wasserdargebot hydratisiert werden, d.h. Hydrathüllen bilden. Die Quellfähigkeit der Dreischichttonminerale beruht auf dieser Hydratation der Zwischenschichtkationen.

Einige Dreischichttonminerale sowie Wechsellagerungsminerale, die Dreischichttonminerale enthalten, vergrößern durch den Wasserzutritt ihr Volumen. Dies wird als Quellen bezeichnet. Das Quellen verläuft in zwei verschiedenen Phasen, dem

- intrakristallinen Quellen

und dem

- interkristallinen Quellen

A.8.2 Intrakristallines Quellen

Bei den Dreischichttonmineralen der Smektit- und der Vermiculitgruppe sowie bei Wechsellagerungstonmineralen, die diese Tonminerale enthalten, kann das Wasser aufgrund der geringen Bindungsenergie der Schichten zwischen diese eindringen und sich an die Kationen der Zwischenschicht binden. Die Abstände der Schichten werden dabei vergrößert,

was mit einer entsprechenden Zunahme des Volumens der Schichten normal zur a-b-Ebene der Minerale zur Folge hat.

Da Wasser in den Zwischenschichten aufgrund der Bindung der Wassermoleküle an den Kationen adsorbiert wird, wird dieser Vorgang als intrakristallines Quellen oder auch Hydratation bezeichnet [Jasmund & Lagaly, 1993].

Diese Hydratation ist abhängig von der Wertigkeit der Zwischenschichtkationen. Sie erfolgt stufenweise. In der ersten Stufe wird eine Schicht aus einer Lage Wassermoleküle adsorbiert, in der zweiten Stufe zwei Lagen und in der dritten Stufe der bzw. vier Lagen. Die Schichtabstände nehmen dabei mit jeder Hydrationsstufe zu, in der vierten Hydrationsstufe beträgt der Schichtabstand dabei bis zu ca. 2 nm (20 Å) [Jasmund & Lagaly, 1993]. Die Volumenvergrößerung beträgt bei der vierten Hydrationsstufe daher bis 100 %. In der „nullten Hydrationsstufe“ ist keine geschlossene Lage aus Wassermolekülen vorhanden, einzelne Wassermoleküle befinden sich jedoch in Hohlräumen der Silikatschichten.

Wird die Volumenvergrößerung behindert, treten Quelldrücke auf. Die Quelldrücke sind bei der ersten Hydrationsstufe am größten und nehmen mit zunehmender Wasseradsorption ab. Bei einem Wyoming-Bentonit betrug der Quelldruck nach Jasmund & Lagaly [1993] bei der

- ersten Hydrationsstufe bis 400 MN/m²,
- zweiten Hydrationsstufe bis 110 MN/m²,
- dritten und vierten Hydrationsstufe bis 27 MN/m².

Die Höhe der Überlagerung zur Erzeugung von Gegendrücken, um Quellhebungen zu behindern, liegt - bei einer Wichte des überlagernden Gebirges von 20 N/m³ - bei ca. 1.350 m für die vierte Hydrationsstufe. Den normalerweise in der Natur vorkommenden Tönen wird entweder aufgrund ihrer Lage unterhalb des Grundwasserspiegels oder zumindest durch einsickerndes Regenwasser meist ausreichend Wasser für den intrakristallinen Quellprozess dargeboten. Daher kann man für den bautechnisch relevanten Teufenbereich davon ausgehen, dass diese Tone meist überwiegend hydratisiert, also intrakristallin gequollen sind.

Die Ordnung der Kristallstruktur der Tonminerale wird bei dieser Art von Quellen nicht verändert, es werden nur die Schichtabstände der T-O-T-Schichten zueinander vergrößert. Wegen der unveränderten Ordnung spricht man hier auch von quasikristallinen Strukturen [Jasmund & Lagaly, 1993].

A.8.3 Interkristallines Quellen

Die Konzentration der Ionen zwischen den T-O-T-Schichten ist im Vergleich zu der Ionenkonzentration der Fluidlösung in der Umgebung des Tonminerals sehr hoch. Diese Ionenschicht ist sehr fest an die Oberfläche der Schicht gebunden, so dass ein Ausgleich der Konzentration nur möglich ist, wenn Wassermoleküle in den Raum zwischen den T-O-T-Schichten eindringen (Abb. A.12). Dies ist aufgrund der Überlappung der diffusen Schicht möglich [Heim, 1990].

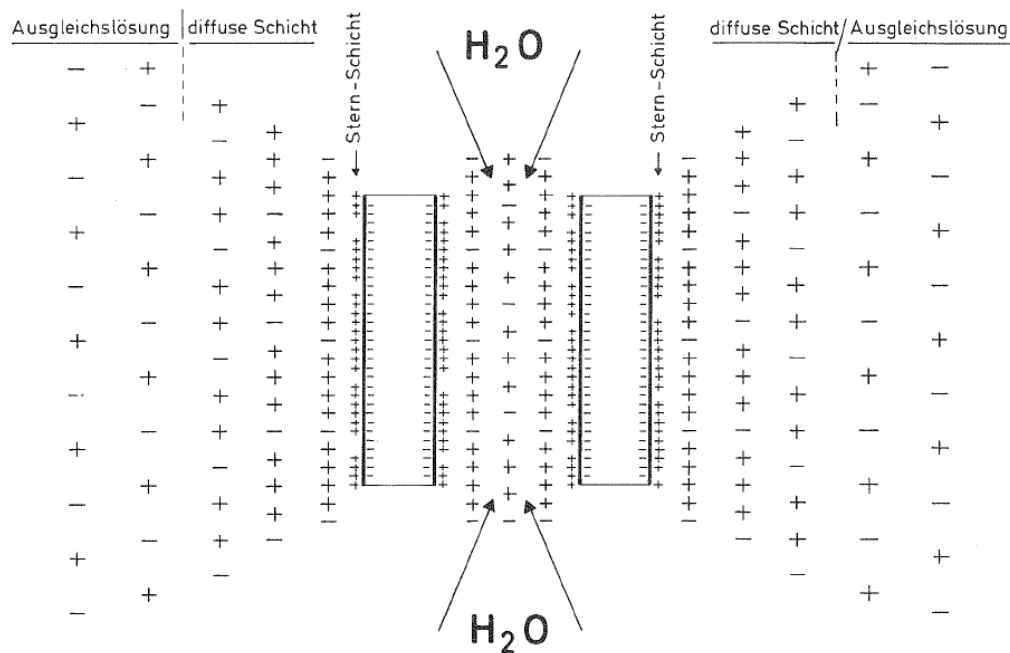


Abbildung A.12: Wasseraufnahme in der Zwischenschicht [Heim, 1990]

Dieser Vorgang ist möglich, wenn in den Zwischenschichten einwertige Kationen (z.B. Lithiumionen oder insbesondere Natriumionen) vorliegen und die Schichtladung $\xi < 0,5$ je Formeleinheit beträgt (bei Natriumionen $\xi < 0,4$), wird der Schichtabstand auf mehr als 2 nm so vergrößert, dass sich die T-O-T-Schichten voneinander trennen und die Schichtpakete zerfallen. Die T-O-T-Schichten (oder dünne Pakete aus wenigen dieser Schichten) liegen jetzt als kolloidale Dispersion vor, wobei sich die Oberflächen gegenseitig abstoßen. Die ehemaligen Kationen der Zwischenschicht umgeben jetzt diese einzelnen T-O-T-Schichten als diffuse Ionenschichten (Abb. A.13). Sind die Zwischenschichten mit anderen als einwertigen Ionen besetzt, z.B. mit zweiwertigen Calciumionen Ca^{2+} ist ein solcher Prozess nicht möglich.

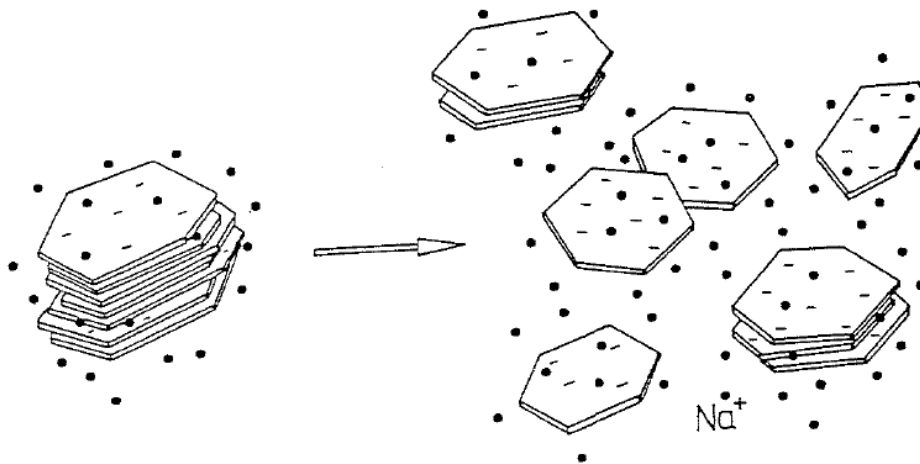


Abbildung A.13: Zerfall der Schichtpakete und diffuse Ionenschichten aus einwertigen Natriumionen [Jasmund & Lagaly, 1993].

Dies ist ein auf den Unterschied der Konzentrationen der Ionen in dem das Tonmineral umgebenden Fluides und der das Tonmineral umgebenden Ionen beruhender Prozess [Jasmund & Lagaly, 1993]. Die Abstände der Schichten werden dadurch vergrößert, das Volumen der Tonminerale nimmt zu. Entsprechend der Ursache dieser Volumenvergrößerung wird der Vorgang als interkristallines Quellen bezeichnet. Der Wirkungsabstand, also der Abstand von der Oberfläche ab der die Konzentration ausgeglichen ist, beträgt hierbei bis zu 500 nm [Jasmund & Lagaly, 1993].

Die Drücke, die bei völliger Behinderung dieser Volumendehnung entstehen, sind geringer als beim intrakristallinen Quellen. Sie betragen aber immer noch bei zu 2 MN/m^2 , was einer Überlagerungshöhe von etwa 100 m (bei einer Wichte des überlagernden Bodens von 20 kN/m^3) entspricht.

Unabdingbare Voraussetzung für diesen Vorgang ist ein ausreichendes Wasserdargebot und eine entsprechend geringe mechanische Spannung, also eine Entlastung des Tons. Bei völliger Entlastung des Tons und ausreichendem Wasserdargebot wird der Prozess erst dann beendet sein, wenn die Ionenkonzentration ausgeglichen ist.

Dieser Quellvorgang hängt von der Ladung der Oberfläche der Tonminerale, den austauschbaren Kationen, und der Elektrolytkonzentration der Porenlösung des Tons ab. Je nach Elektrolytkonzentration kann sich die Quelldehnung bzw. der Quelldruck ändern. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche wird die Bindung schwächer, bzw. es liegt eine ausgeglichene Konzentration vor. Die Theorie, die die Wechselwirkung zwischen den Anziehungskräften (van-der-Waals-Kräfte) einerseits und den Abstoßungskräften (elektrostatische Abstoßung, Bornsche Abstoßung) andererseits (bei Konzentrationsausgleich)

in Abhängigkeit des Abstandes von Kolloiden beschreibt wird als DLVO-Theorie (nach Derjaguin, London, Verwey und Overbeek) bezeichnet. Die Wechselwirkung von Abstoßung und Anziehung ist in Abb. A.14 dargestellt.

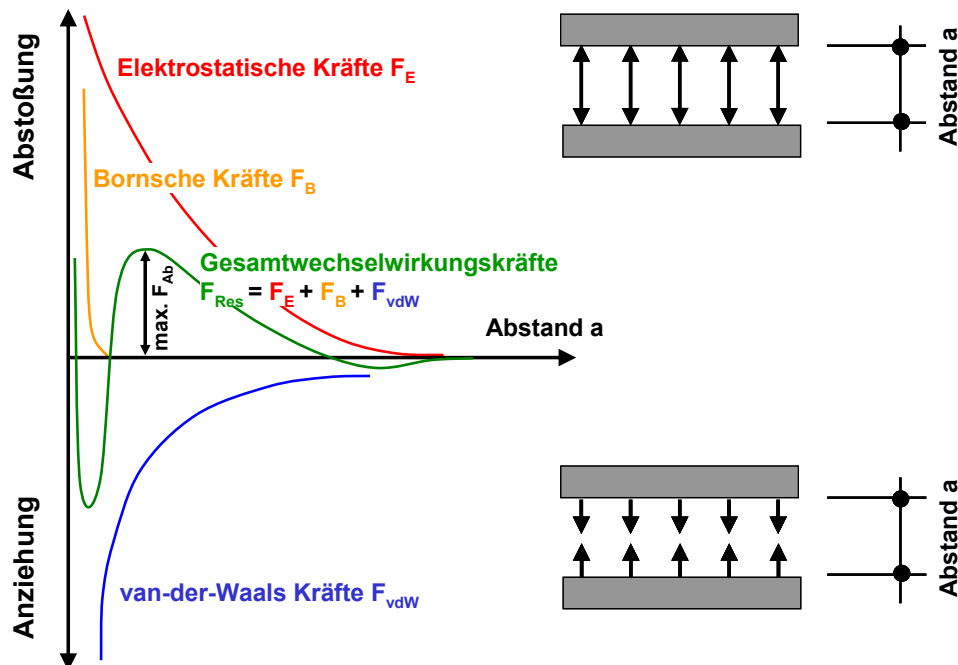


Abbildung A.14: Wechselwirkung zwischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte nach der DLVO-Theorie, verändert und ergänzt nach Lagaly, Schulz, Ziemehl [1997]

Wenn sich die diffusen Schichten überlappen, gehören sie zu einem System und sie ziehen sich gegenseitig an. Steigt der Abstand, werden die Abstoßungskräfte (aufgrund der gleichsinnigen elektrischen Ladung) größer als die Anziehungskräfte, es kommt zur Abstoßung [Jasmund & Lagaly, 1993]. Mit noch größer werdendem Abstand nähern sich die Abstoßungskräfte asymptotisch dem Nullpunkt, es herrschen weder Anziehungs- noch Abstoßungskräfte. Die Abstoßungskräfte sind wesentlich von der Elektrolytkonzentration der Lösung abhängig. Ursache ist die Annäherung der Konzentration der Ionen in der diffusen Ionenschicht und der Ionen in der Lösung. Ist die Lösung genauso hoch konzentriert wie in der diffusen Ionenschicht, kann kein Transport von Ionen stattfinden, die Abstände der Teilchen verändern sich nicht. Es überwiegen die anziehenden Kräfte. Die Teilchen haben dann einen koagulierten Zustand. Gibt man z.B. zu einer Stützsuspension Kochsalz hinzu, erhöht man die Elektrolytkonzentration und die Tonminerale (d.h. die T-O-T-Schichten) koagulieren. Die Suspension verliert ihre stützende Wirkung [Jasmund & Lagaly, 1993].

Eine solche kolloidale Dispersion wird im Spezialtiefbau und beim Bohren (in diesem Bereich hat sich der Begriff „Bentonitsuspension“ für solche Dispersionen etabliert) in Böden benutzt, wobei man sich folgende Effekte zunutze macht:

1. Thixotropie

Die Thixotropie beruht auf der Anisotropie der elektrischen Ladung von Oberflächen und Kanten der Tonminerale. Die negativ geladenen Oberflächen ziehen die positiv geladenen Kanten an. Es entsteht eine stabile, wabenartige Kartenhausstruktur (Bild A.15).

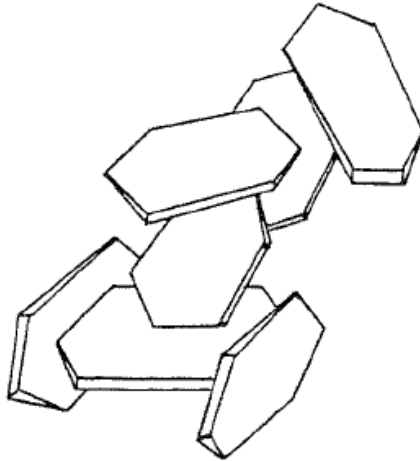


Abbildung A.15: Kartenhausstruktur

Diese Kartenhausstruktur zerfällt sofort bei mechanischer Beanspruchung und bildet sich danach rasch wieder neu. Diese Kartenhausstruktur zerfällt auch sofort bei Änderung der Ladungen der Oberflächen / Kanten:

- bei Anlegen einer elektrischen Spannung an die Dispersion werden die Oberflächen bzw. die Flüssigkeit anders geladen.
- Bei Änderung des pH-Wertes in den basischen Bereich sind die Kanten nicht mehr positiv, sondern negativ geladen. Die T-O-T-Schichten stoßen sich nur noch gegenseitig ab. Eine stabile Struktur kann nicht mehr gebildet werden.
- Bei Zugabe von Calciumionen zu einer solchen o.g. Dispersion koagulieren diese Dispersion mit T-O-T-Schichten und diffusen Natriumionenschichten [Jasmund & Lagaly, 1993].

2. Die Bildung undurchlässiger Schichten

In dispersem Zustand bilden sich beim Absetzen oder Entfernen des Lösungsmittels dünne, aber wasserundurchlässige Schichten. Dies geschieht z.B. bei Verstopfen von Sandporen mit dispersen Na-Montmorillonit-Teilchen. An der Grenzfläche bildet sich eine undurchlässige Schicht, der sog. Filterkuchen. Beim Aggregieren der Teilchen, z.B. bei Calciumionen in den Zwischenschichten, wird der Filterkuchen dicker und auch durchlässiger [Jasmund & Lagaly, 1993].

Aus dem Grunde müssen Montmorillonite für den Einsatz als Stützflüssigkeit, soweit sie nicht geogen bedingt Natriumionen in den Zwischenschichten besitzen, so behandelt werden, dass diese als Zwischenschichtkationen eingebaut werden. Dies bezeichnet man als sog. „Aktivierung“ oder „Natriumaktivierung“ oder „alkalische Aktivierung“ eines Montmorillonits. Dazu wird Soda (Natron) in den Ton maschinell eingeknetet. Soda ist ein Natriumcarbonathydrat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Das Calcium in den Zwischenschichten verbindet sich mit dem CO_3 der Soda zu Calciumcarbonat CaCO_3 , also Kalk. Dieser wird im Ton ausgefällt. Die frei werdenden Zwischenschichtplätze werden nun von den Natriumionen eingenommen [Jasmund & Lagaly, 1993]. Eine vollständige Umsetzung der Calciumionen ist praktisch aber kaum möglich, so dass neben Natriumionen auch immer Calciumionen vorhanden sind.

A.9 Spezifische Oberfläche

Durch das Bestreben der entsprechenden Dreischichttonminerale Wassermoleküle in ihre Zwischenschichten einzulagern bzw. zu binden, oder allgemein Wassermoleküle an der Kornoberfläche zu adsorbieren, weisen Tonminerale ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Wasseraufnahmevermögen auf. Außer dem enormen Wasserbindevermögen ist die hohe Wasseraufnahme von Tonen auch eine Funktion ihrer hohen spezifischen Oberfläche. Tonmineralkörner sind sehr klein und haben daher eine hohe spezifische Oberfläche. Je größer diese spezifische Oberfläche ist, desto mehr Wasser kann dort gebunden werden. In der Tabelle A.2 sind Anhaltswerte für spezifische Oberflächen einiger Tonminerale zusammengestellt.

Tabelle A.2: Spezifische Oberfläche ausgewählter Tonminerale (Heim, 1990)

Tonmineral	Spezifische Oberfläche [m ² /g]
Kaolin-Minerale	1 - 40
Illit	50 - 200
Smektit	600 - 800
Vermiculit	600 - 700
Chlorit	< 200

A.10 Saugspannung

Steht kein Wasser (oder andere Ionen) zur Verfügung, bildet sich wegen des Bestrebens der Tonminerale, Ionen und damit Wassermoleküle zu binden ein entsprechendes Wasserbindevermögen aus, welche z.B. durch eine Saugspannung oder ein Potenzial ausgedrückt werden kann. Die Höhe dieses Potentials ist einerseits abhängig von der Art des

Tonminerals (Dies bestimmt die Wasseraufnahmekapazität) und dem Kapillarporenraum, der durch die Lagerungsdichte und die Korngröße des Tonbodens bestimmt wird. Außerdem bestimmt der Wassergehalt, bzw. der Wassersättigung das

Die Saugspannung trockener Tone kann mehrere 10.000 kN/m² betragen. Bei vollständiger Wassersättigung ist die Saugspannung gleich Null.

Anhang B: Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM)

Die folgende Beschreibung der Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM) ist im Wesentlichen auf die Beschreibung in der Arbeit von Hug [2006] entnommen.

Die Auflösung von Mikroskopen ist von der Wellenlänge der Strahlung abhängig, wobei die Grenze der Auflösung die Hälfte der Wellenlänge beträgt. Ein konventionelles optisches Mikroskop kann daher Strukturen bis etwa 200 nm auflösen. Die Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM) verwendet Elektronenstrahlen deren Wellenlänge um ein Vielfaches kürzer ist als die des sichtbaren Lichtes. Daher sind stufenlose Vergrößerungen bis zum 10.000 -fachen möglich, was die Auflösung von Strukturen im Nanometerbereich ermöglicht.

Bei der Methode wird die Oberfläche einer Probe betrachtet. Im Gegensatz zur herkömmlichen Rasterelektronenmikroskopie (Scanning Electron Microscopy, SEM) müssen die Proben für die Messung im ESEM nicht aufbereitet werden. Bei der Scanning Electron Microscopy wird das trockene Material z.B. mit Gold bedampft wird. Dies ist im ESEM nicht nötig. Es können feuchte, ölige oder entgasende Substanzen analysiert werden. Ein Trocknen der Probe und die damit einhergehende mögliche Zerstörung der Strukturen einer Probe, sind ebenfalls nicht notwendig. Es können verhältnismäßig große Proben bis etwa Faustgröße untersucht werden.

Eine Elektronenkanone erzeugt in einem Vakuum einen Elektronenstrahl. Hierbei sind Beschleunigungsspannungen von 2 kV bis 30 kV nötig. Ein System aus elektromagnetischen Linsen (Kondensorlinsen) fokussiert in einer Probenkammer den Strahl auf die Oberfläche einer Probe. In der Probenkammer wird die Probe auf einem verstellbaren Probentisch befestigt, der während der Betrachtung gedreht und verschoben werden kann, so dass verschiedene Stellen der Oberfläche betrachtet werden können.

Trifft der Elektronenstrahl auf die Probe, verliert er Energie. Diese Energie wird vom untersuchenden Material in verschiedenen Formen emittiert. Jede Emission ist ein potentielles Signal, aus welchen über elektronische Datenverarbeitung ein virtuelles Bild errechnet werden kann.

Bei dem abbildenden System handelt es sich um eine Kathodenstrahlröhre (Cathode Ray Tube, kurz CRT). Der Elektronenstrahl scannt Punkt für Punkt ein rechteckiges Raster der Probenoberfläche ab. Wandert der Strahl, entstehen Kontraste durch die Abhängigkeit des benutzten Detektorsignals und der Probenoberfläche (Kontrastanhebung durch elektronische Aufarbeitung). Somit wird die Morphologie der Probe ermittelt.

Die Vorzüge des ESEM sind:

- die einfache Elektronenoptik,
- die einfache elektronische Signalverarbeitung,
- die große Tiefenschärfe,
- die Möglichkeit der stufenlosen Vergrößerung bis zum Zehntausendfachen,
- die Verwendbarkeit großer Proben,
- die einfache Präparation der Proben.

Das ESEM verfügt zusätzlich über eine energie-dispersive Röntgen-Mikroanalyse (EDX). Diese erlaubt aufgrund der Emission charakteristischer Röntgenstrahlungen eine Aussage über die elementare Zusammensetzung einer Probe.

Die Abbildung B.1 zeigt eine Prinzipdarstellung der Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM).

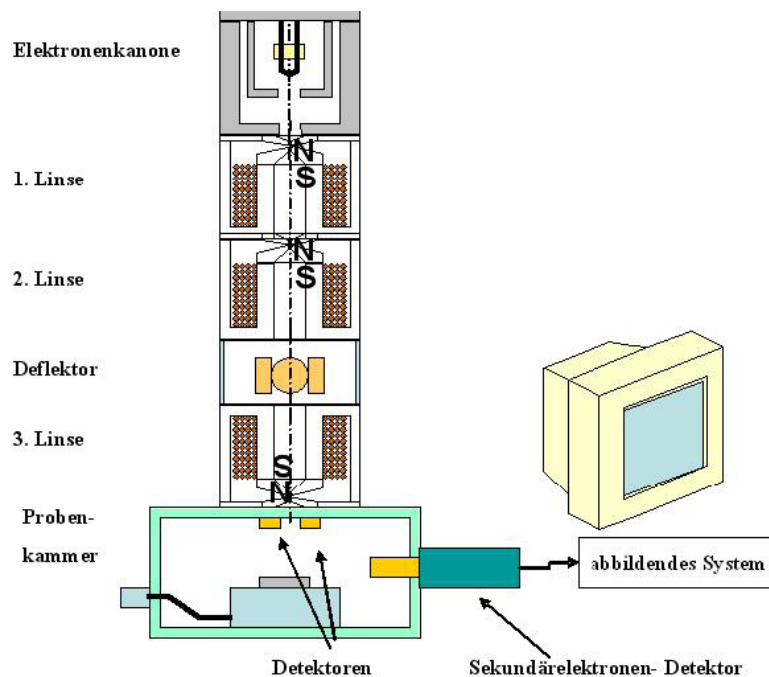


Abbildung B.1: Prinzipdarstellung der Environmental Scanning Electron Microscopy

Anhang C: Spaltzugversuche

Für die Versuchstone KI-W und SI-B wurde die Zugfestigkeit in Spaltzugversuchen in Anlehnung an die entsprechende Empfehlung der ISRM [1978] sowie an Schick [2005] bestimmt. Der Wassergehalt der Versuchstone wurde so eingestellt, dass die Konsistenz $I_c = 1,0$ beim Versuchston KI-W und $I_c = 0,95$ beim Versuchston SI-B betrug.

Dazu wurden Probekörper im Proctortopf entsprechend den Arbeitsanweisungen in DIN 18127 zum Proctorversuch hergestellt. Die Probekörper wurden anschließend aus den Proctortopf ausgedrückt. Die Länge der Probekörper betrug $l = 120$ mm, der Durchmesser $d = 100$ mm.

Die Probekörper wurden in die Spaltzugvorrichtung eingebaut und wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 mm/min bis zur Ausbildung eines durchgehenden Risses belastet (Abb. C.1).

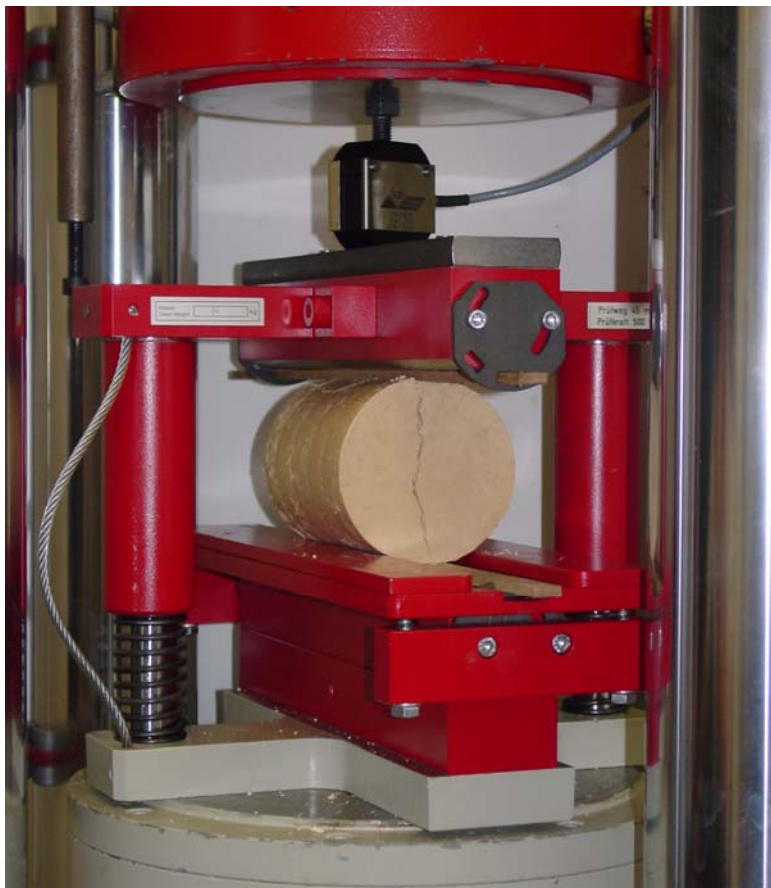


Abbildung C.1: Spaltzugversuch an einem Probekörper des Versuchston KI-W

Die Ergebnisse der Spaltzugversuche sind als Kraft-Zeit-Diagramme (KI-W) bzw. als Kraft-Weg-Diagramme (SI-B) in den Abbildungen C.2 (Versuchston KI-W) und C.3 (Versuchston SI-B) dargestellt. Die obere Belastungseinrichtung des Spaltzuggerätes wird durch Federn mit einer

hohen Steifigkeit gehalten. Die Federkräfte sind als lineare Abschnitte der Messkurven zu erkennen. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse muss die Federkraft berücksichtigt werden.

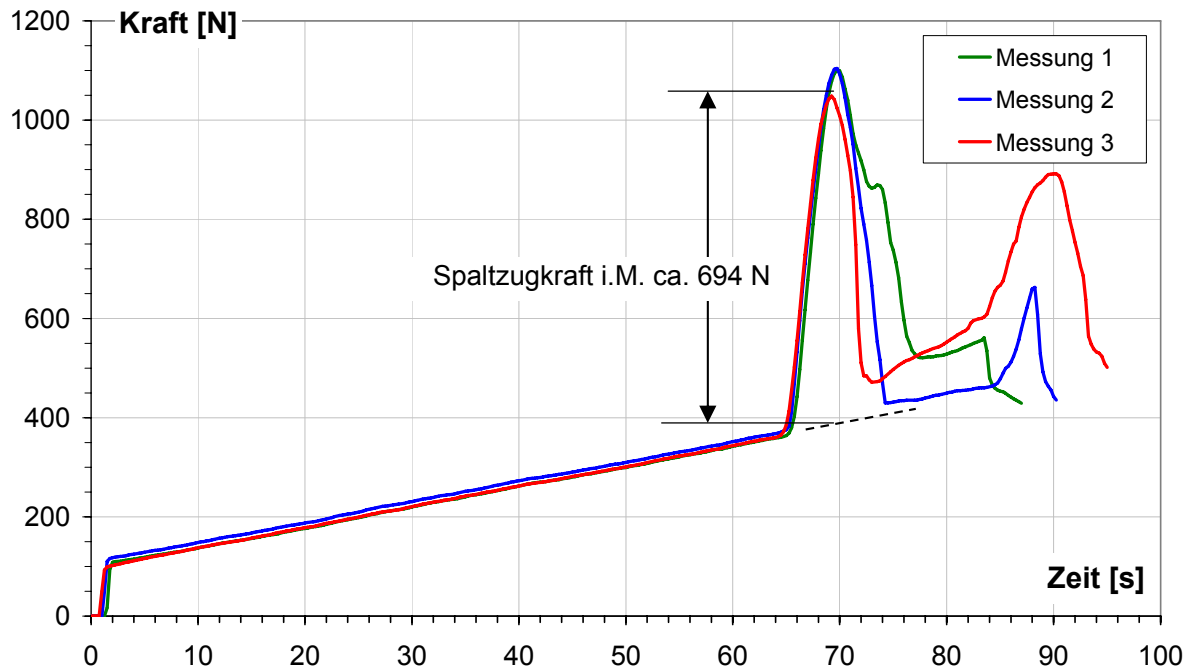


Abbildung C.2: Ergebnisse Spaltzugversuch Versuchston KI-W, $I_C = 1,0$

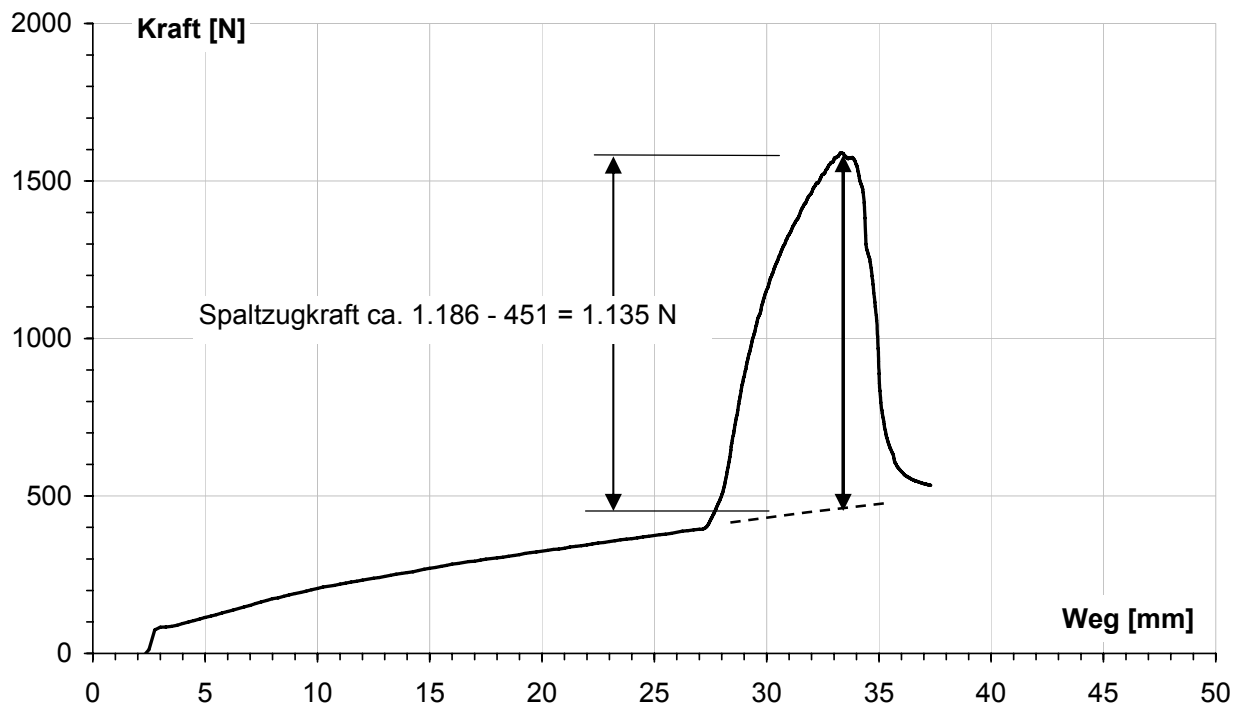


Abbildung C.3: Ergebnisse Spaltzugversuch Versuchston SI-B, $I_C = 0,95$

Die Zugfestigkeiten werden in Anlehnung an ISRM [1978] sowie an Schick [2005] mit Gleichung C.1 ermittelt.

$$q_{sz} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad \text{Gln. C.1}$$

Darin ist:

	Formelzeichen / Bezeichnung	Dimension	Einheit
q_{sz}	: Spaltzugfestigkeit	Kraft / Länge ²	[kN/m ²]
F	: Spaltzugkraft	Kraft	[kN]
l	: Länge des Probekörpers	Länge	[m]
d	: Durchmesser des Probekörpers	Länge	[m]

In Tabelle C.1 sind die gemessenen Spaltzugkräfte und die sich daraus ergebenden Spaltzugfestigkeiten zusammengestellt.

Tabelle C.1: Versuchsergebnisse

Versuchs- ton	Konsistenz- zahl	Messung	Spaltzug- kraft	Mittelwert	Standard- abweichung	Standard- abweichung in % des Mittelwertes	Spaltzug- festigkeit
	I_c [-]		F [N]	F [N]	s [N]	s/F [%]	q_{sz} [kN/m ²]
KI-W	1,0	1	709	694	31	4,5	36,8
		2	714				
		3	658				
SI-B	0,95	1	1.135	-	-	-	60,2

Anhang D: Struktur von Oberflächen

Im Hinblick auf die geometrische Struktur werden drei verschiedene Arten der Oberfläche definiert [Habenicht, 2006]:

- die geometrische Oberfläche
- die wahre Oberfläche
- die wirksame Oberfläche

Geometrische Oberfläche (A_{Ge})

Die geometrische Oberfläche ist die Fläche, die durch den Umfang des anhaftenden Bodenkörpers oder des anhaftenden Werkstoffstückes bestimmt ist. Im Falle der Adhäsionsmessung entspricht die geometrische Oberfläche der geometrischen Querschnittsfläche des Stempels.

Wahre Oberfläche (A_{Wa})

Die wahre Oberfläche ist die tatsächliche, durch die Rauheit bestimmte, morphologische Oberfläche. Sie ist im Regelfall wesentlich größer als die geometrische Oberfläche und nur bei - theoretisch möglicher- völlig glatter Oberfläche gleich der geometrischen Oberfläche.

Wirksame Oberfläche (A_{Wi})

Sie stellt den Anteil der wahren Oberfläche dar, der durch den Klebstoff benetzt wird, zur Ausbildung von Grenzschichtreaktionen in der Lage ist und wirklich zu der Festigkeit der Klebung beiträgt.

Die Oberflächenarten sind in Abbildung dargestellt.

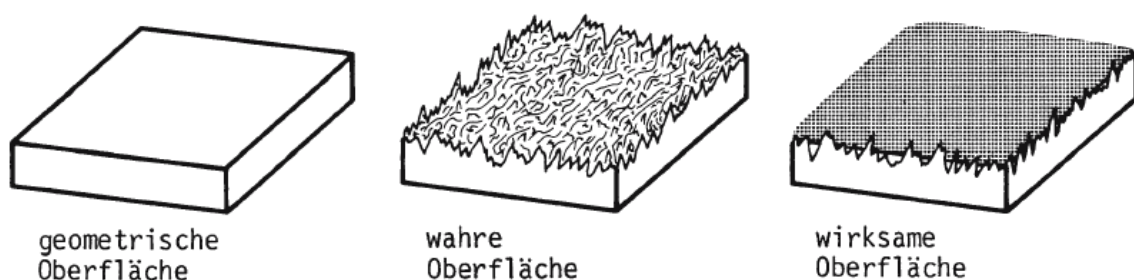


Abbildung D.1: Oberflächenarten [Habenicht, 2006]

Es ergibt sich demnach die Beziehung der Größe der Oberflächen nach Gl. D.1

$$A_{Wa} > A_{Wi} > A_{Ge}$$

Gl. D.1

Anhang E: Rauheit von Oberflächen

Die Rauheit von Oberflächen, d.h. die mikrogeometrische Gestaltabweichung der wahren Oberfläche von der idealen, geometrischen Oberfläche ist eine wichtige Eigenschaft von technischen Oberflächen [Czichos et al., 2003].

Die Rauheit wird durch die Fertigung des Werkstoffes wesentlich beeinflusst. Die geometrische Oberfläche ist praktisch nicht zu erreichen. Die Gestaltabweichung von der geometrischen Oberfläche wird als Oberflächenrauheit bezeichnet, diese kann messtechnisch erfasst werden.

Die Oberflächenrauheit wird durch „Senkrechtkenngrößen“ und „Waagrechtkenngrößen“ beschrieben, die sich im Regelfall auf einen Profilschnitt der betrachteten Oberfläche beziehen [Czichos et al., 2003]. Das Bezugssystem ist im Regelfall dabei die geometrische Oberfläche, die mit der Hauptrichtung der wahren Oberfläche übereinstimmen sollte. Die Messgrößen zur Beschreibung der Oberflächenrauheit sind in DIN ISO 4287 genormt. Es werden folgende Begriffe definiert [Grote et al., 2005, Czichos et al., 2003, DIN ISO 4287].

Profilabweichung

Die Profilabweichung (y) ist ein Messrichtung ermittelter Abstand eines Punktes des Oberflächenprofils von der Bezugslinie.

Bezugslinie

Die Bezugslinie ist eine Linie des geometrischen Profils innerhalb einer Bezugsstrecke l , die das wirkliche Profil so durchschneidet, dass die Summe der Quadrate der Profilabweichung von dieser Linie ein Minimum wird. Diese Linie wird auch als Mittellinie m definiert.

Maximale Profilkuppenhöhe

Die maximale Profilkuppenhöhe R_p ist der Abstand des höchsten Punktes des Profils von der Mittellinie innerhalb der Bezugsstrecke.

Maximale Profiltiefe

Die maximale Profiltiefe R_m ist der Abstand des tiefsten Punktes des Profils von der Mittellinie innerhalb der Bezugsstrecke.

Maximale Profilhöhe

Die maximale Profilhöhe R_y ist der Abstand zwischen der Linie der Profilkuppen (obere Berührlinie) und der Linie der Profiltäler (untere Berührlinie). Die obere und die untere Berührlinie sind parallel zur Bezugslinie. Es gilt Gleichung E.1.

$$R_y = R_p + R_m \qquad \text{Gln. E.1}$$

Arithmetischer Mittenrauhwert

Der arithmetische Mittenrauhwert R_a ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Werte der Profilabweichung innerhalb der Bezugsstrecke (Abb. E.1). Der arithmetische Mittenrauhwert entspricht der Höhe eines Rechteckes mit der Bezugsstrecke l als Seitenlänge, das flächengleich ist der Summe der vom Profil und der Bezugslinie eingeschlossenen Fläche.

Zehnpunkthöhe

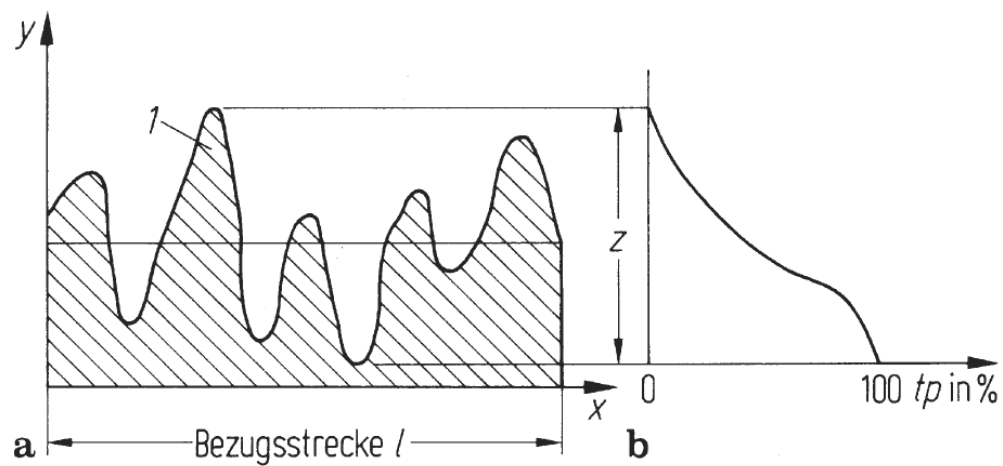
Die Zehnpunkthöhe $R_{z, ISO}$ ist der Mittelwert der Absolutwerte der fünf höchsten Profilkuppen und der Absolutwerte der Tiefen der fünf tiefsten Profiltäler innerhalb einer Bezugsstrecke.

Gemittelte Rauhtiefe

Die gemittelte Rauhtiefe ist der Mittelwert der Rauheitskenngrößen von fünf Bezugsstrecken innerhalb einer Auswertlänge (Abb. E.1).

Profiltraganteil

Der Profiltraganteil t_p ist das Verhältnis der tragenden Längen l_t zur Bezugsstrecke l . Die tragende Länge l_t ist die Summe der Schnittlängen, die innerhalb der Bezugsstrecke im Werkstoff des Profils durch eine Schnittlinie äquidistant zur Bezugslinie mit dem Niveauabstand z entstehen.



$$\text{Mittenrauhwert } R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

$$\text{gemittelte Rauhtiefe } R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i$$

Abbildung E.1: Definition des Mittenrauhwertes und der gemittelten Rauhtiefe [Grote et al., 2005]

Anhang F: Protokolle der Rauheitsmessungen der AdhäsionstestzylinderAdhäsionstestzylinder mit feinpolierter Oberfläche, $R_z = 0,088 \mu\text{m} \approx 0,1 \mu\text{m}$ (erster Zylinder)

Technische Universität Darmstadt
Staatliche Materialprüfungsanstalt
Abteilung Oberflächentechnik

Auftrag Nr.	
Auftraggeber	Burbaum

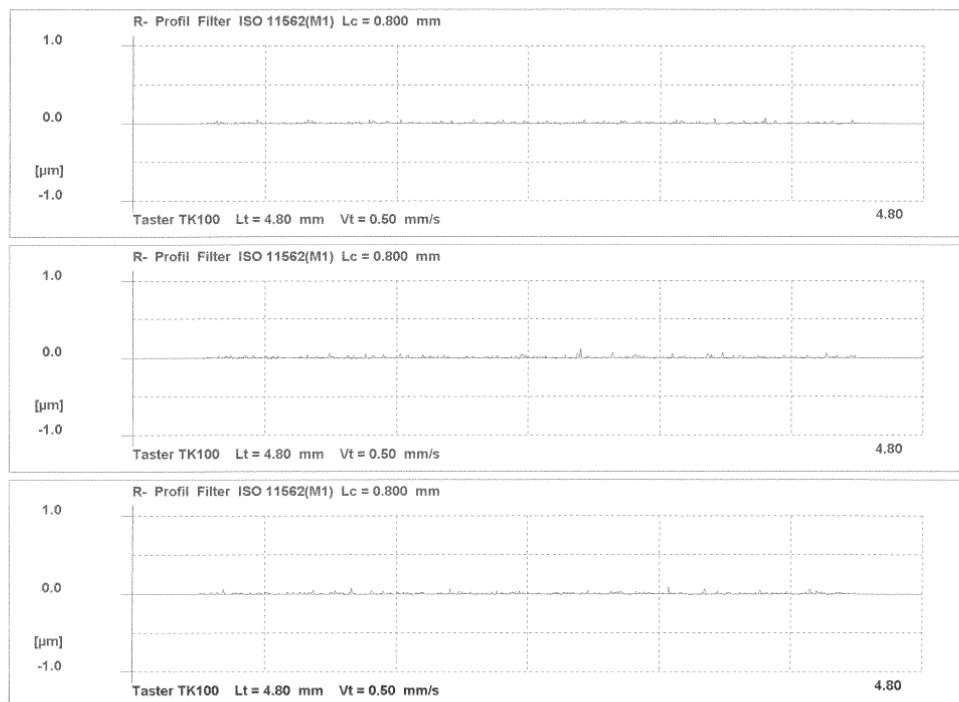
Messobjekt
Probennummer
Werkstoff
Information
Taster-Nr.
Prüfer

Stempel
B
Stahl
geläppt
TKL100-1606
O/Shd

HOMMELWERKE
TURBO RAUHEIT V6.14
Messbedingungen
Taster-Typ : TK100
Messbereich : 80 μm
LV: waveline 60
Taststrecke : 4.80 mm
Geschwindigkeit : 0.50 mm/s
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)
Lc / Ls: 100
Tasterfaktor: AUS

13.07.07
D:\T8000\Daten-Rauheit\Shd2007\Geowiss\Probe
B-geläppt1003.pip

Liste Kenngrößen					Statistik n = 9			
Nr.	Ra	Rz	Rt	Rp	Nr.	Kenngrößen Xq	Range	S
1	0.009	0.078	0.088	0.067	1	Ra	0.009	0.002
2	0.010	0.093	0.135	0.113	2	Rz	0.088	0.027
3	0.009	0.087	0.116	0.093	3	Rt	0.134	0.099
4	0.008	0.091	0.187	0.164	4	Rp	0.110	0.097
5	0.009	0.095	0.145	0.123				
6	0.010	0.099	0.166	0.134				
7	0.009	0.101	0.155	0.125				
8	0.009	0.074	0.115	0.091				
9	0.009	0.077	0.097	0.076				



Adhäsionstestzylinder mit feinpolierter Oberfläche, $R_z = 0,106 \mu\text{m} \approx 0,1 \mu\text{m}$ (zweiter Zylinder)



Technische Universität Darmstadt
Staatliche Materialprüfungsanstalt
Abteilung Oberflächentechnik

Auftrag Nr.	
Auftraggeber	Burbaum

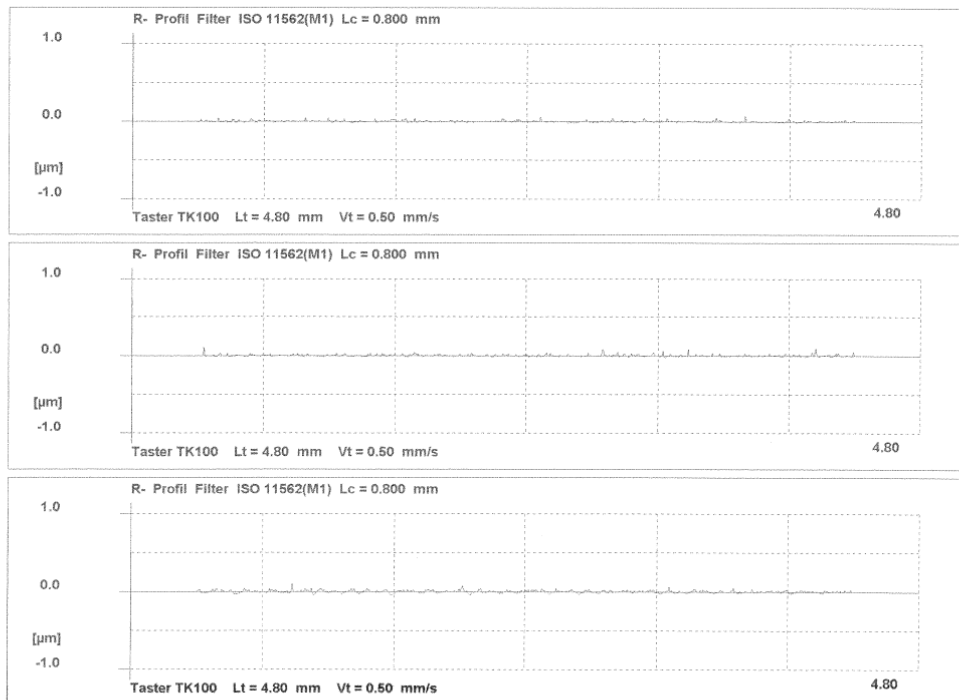
Messobjekt
Probennummer
Werkstoff
Information
Taster-Nr.
Prüfer

Stempel
A
Stahl
geläppt
TKL100-1606
O/Shd

13.07.07
D:\T8000\Daten-Rauheit\Shd2007\Geowiss\Probe
A-geläppt1003.pip

HOMMELWERKE
TURBO RAUHEIT V6.14
Messbedingungen
Taster-Typ : TK100
Messbereich : 80 μm
LV: waveline 60
Taststrecke : 4.80 mm
Geschwindigkeit : 0.50 mm/s
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)
Lc / Ls: 100
Tasterfaktor: AUS

Liste Kenngrößen					Statistik n = 9				
Nr.	Ra	Rz	Rt	Rp	Nr.	Kenngrößen Xq	Range	S	
1	0.009	0.078	0.106	0.079	1	Ra	0.014	0.022	0.008
2	0.009	0.098	0.132	0.106	2	Rz	0.106	0.122	0.038
3	0.013	0.110	0.159	0.109	3	Rt	0.140	0.140	0.044
4	0.026	0.148	0.186	0.103	4	Rp	0.096	0.064	0.019
5	0.031	0.193	0.237	0.133					
6	0.010	0.093	0.124	0.096					
7	0.009	0.071	0.097	0.069					
8	0.009	0.077	0.114	0.089					
9	0.009	0.088	0.106	0.076					



Adhäsionstestzylinder mit polierter Oberfläche ($R_z = 9,803 \mu\text{m} \approx 9,8 \mu\text{m}$)



Technische Universität Darmstadt
Staatliche Materialprüfungsanstalt
Abteilung Oberflächentechnik

Auftrag Nr.	
Auftraggeber	Geowiss.

Messobjekt
Probennummer
Information
Taster-Nr.
Prüfer

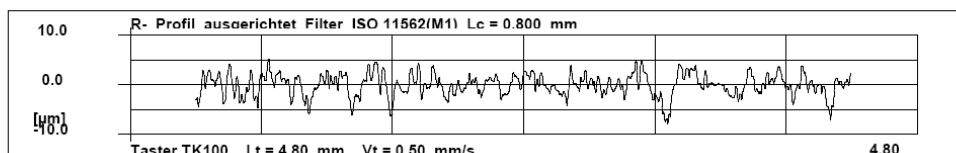
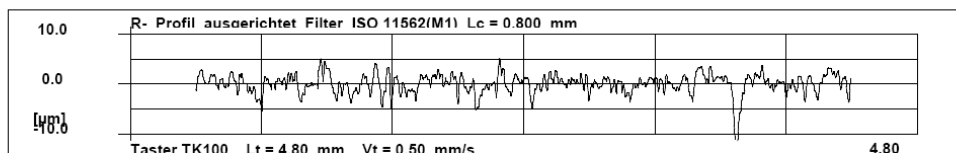
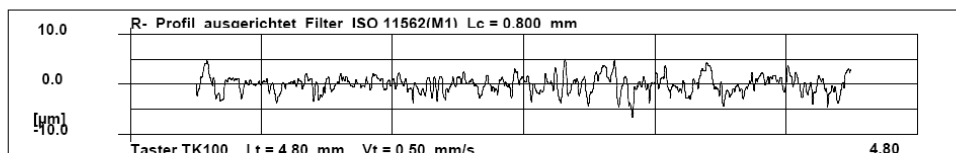
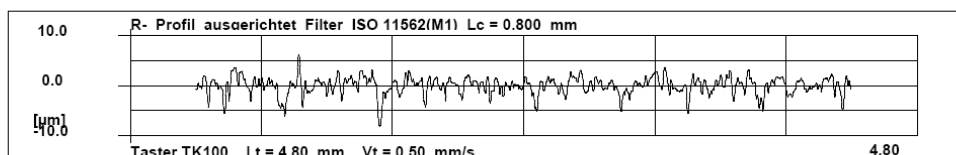
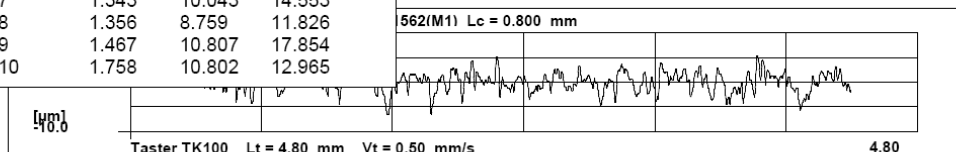
Stempel
ohne Bezeichnung
gedreht + geglättet
TKL100-1606
O/Shd

HOMMELWERKE
TURBO RAUHEIT V6.14
Messbedingungen
Taster-Typ : TK100
Messbereich : 80 μm
LV: waveline 60
Taststrecke : 4.80 mm
Geschwindigkeit : 0.50 mm/s
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)
Lc / Ls: 100
Tasterfaktor: AUS

22.11.07
D:\T8000\Daten-Rauheit\Shd2007\Geowiss\Probe
ohne-gedreht10010.pip

Liste Kenngrößen			
Nr.	Ra	Rz	Rt
1	1.463	9.847	11.337
2	1.336	9.418	10.749
3	1.538	9.913	12.624
4	1.551	9.929	12.071
5	1.522	8.898	11.189
6	1.536	9.610	11.980
7	1.343	10.043	14.553
8	1.356	8.759	11.826
9	1.467	10.807	17.854
10	1.758	10.802	12.965

Statistik n = 10			
Nr.	Kenngrößen	Xq	Range S
1	Ra	1.487	0.422 0.121
2	Rz	9.803	2.048 0.647
3	Rt	12.715	7.105 1.992



Adhäsionstestzylinder mit gedrehter Oberfläche ($R_z = 17,3 \mu\text{m}$)



Technische Universität Darmstadt
Staatliche Materialprüfungsanstalt
Abteilung Oberflächentechnik

Auftrag Nr.	
Auftraggeber	Burbaum

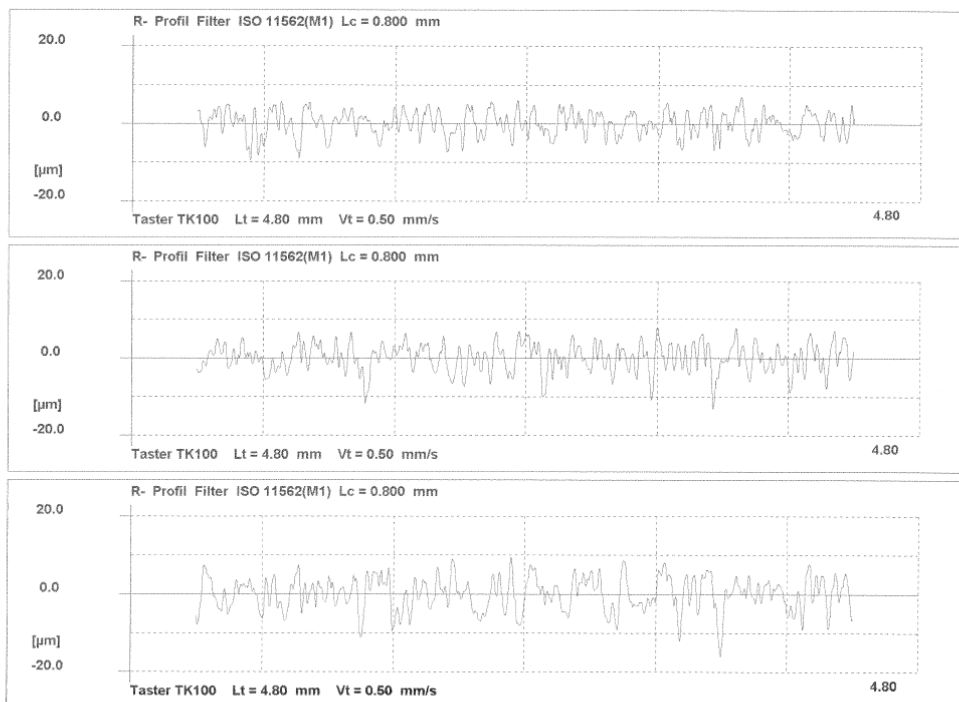
Messobjekt
Probennummer
Werkstoff
Information
Taster-Nr.
Prüfer

Stempel
D
Stahl
gedreht
TKL100-1606
O/Shd

HOMMELWERKE
TURBO RAUHEIT V6.14
Messbedingungen
Taster-Typ : TK100
Messbereich : $80 \mu\text{m}$
LV: waveline 60
Taststrecke : 4.80 mm
Geschwindigkeit : 0.50 mm/s
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)
Lc / Ls: 100
Tasterfaktor: AUS

16.07.07
D:\T8000\Daten-Rauheit\Shd2007\Geowiss\Probe
D-Stahl-gedreht1007.pip

Liste Kenngrößen					Statistik n = 9			
Nr.	Ra	Rz	Rt	Rp	Nr.	Kenngrößen Xq	Range	S
1	2.646	13.224	16.558	7.034	1	Ra	3.131	0.286
2	2.893	16.814	21.883	9.166	2	Rz	17.311	1.935
3	3.112	16.156	19.573	9.064	3	Rt	21.840	2.711
4	2.899	17.142	21.052	7.899	4	Rp	8.881	0.861
5	3.077	16.408	20.430	8.658				
6	3.084	17.596	23.813	9.859				
7	3.512	19.917	25.578	9.374				
8	3.477	19.235	22.316	9.037				
9	3.478	19.307	25.359	9.834				



Adhäsionstestzylinder Stahl, chrombeschichtet ($R_z = 0,681 \mu\text{m} \approx 0,7 \mu\text{m}$)



Technische Universität Darmstadt
Staatliche Materialprüfungsanstalt
Abteilung Oberflächentechnik

Auftrag Nr.	
Auftraggeber	Burbaum

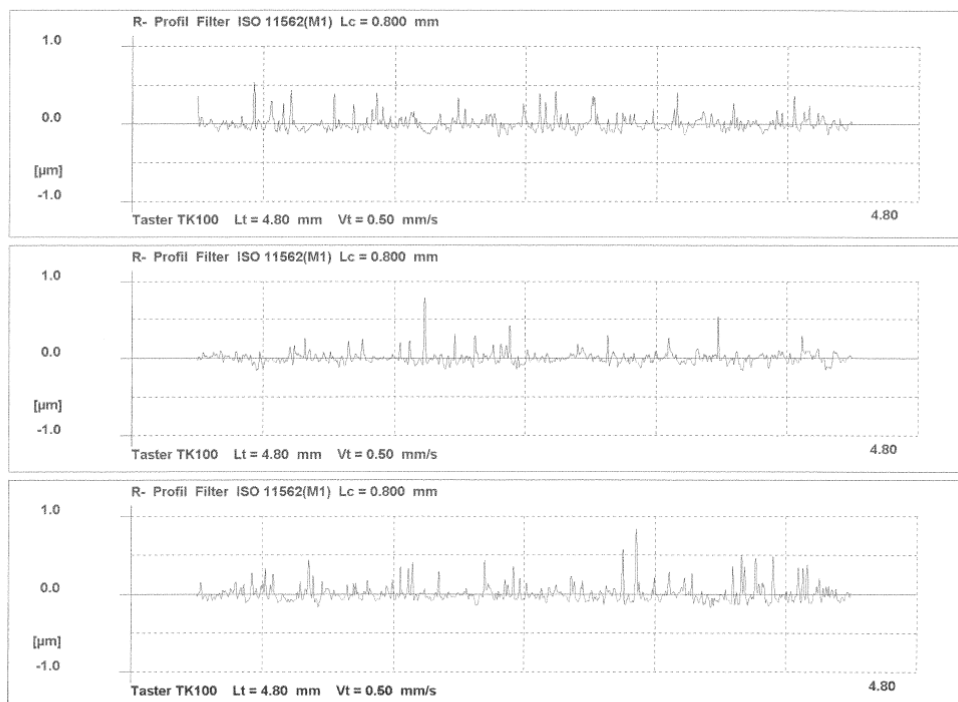
Messobjekt
Probennummer
Werkstoff
Information
Taster-Nr.
Prüfer

Stempel
C
Stahl
verchromt
TKL100-1606
O/Shd

HOMMELWERKE
TURBO RAUHEIT V6.14
Messbedingungen
Taster-Typ : TK100
Messbereich : 80 μm
LV: waveline 60
Taststrecke : 4.80 mm
Geschwindigkeit : 0.50 mm/s
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)
Lc / Ls: 100
Tasterfaktor: AUS

13.07.07
D:\T8000\Daten-Rauheit\Shd2007\Geowiss\Probe
C-verchromt1003.pip

Liste Kenngrößen					Statistik n = 9			
Nr.	Ra	Rz	Rt	Rp	Nr.	Kenngrößen Xq	Range	S
1	0.063	0.573	0.710	0.541	1	Ra	0.068	0.042
2	0.052	0.605	0.942	0.781	2	Rz	0.681	0.256
3	0.072	0.676	1.018	0.839	3	Rt	0.934	0.403
4	0.094	0.804	1.113	0.926	4	Rp	0.747	0.141
5	0.056	0.612	0.759	0.603				
6	0.083	0.829	1.107	0.831				
7	0.068	0.718	1.041	0.851				
8	0.058	0.642	0.807	0.626				
9	0.068	0.674	0.912	0.722				



Adhäsionstestzylinder PTFE (Teflon) ($R_z = 6,628 \mu\text{m} \approx 6,6 \mu\text{m}$)



Technische Universität Darmstadt
Staatliche Materialprüfungsanstalt
Abteilung Oberflächentechnik

Auftrag Nr.	
Auftraggeber	Burbaum

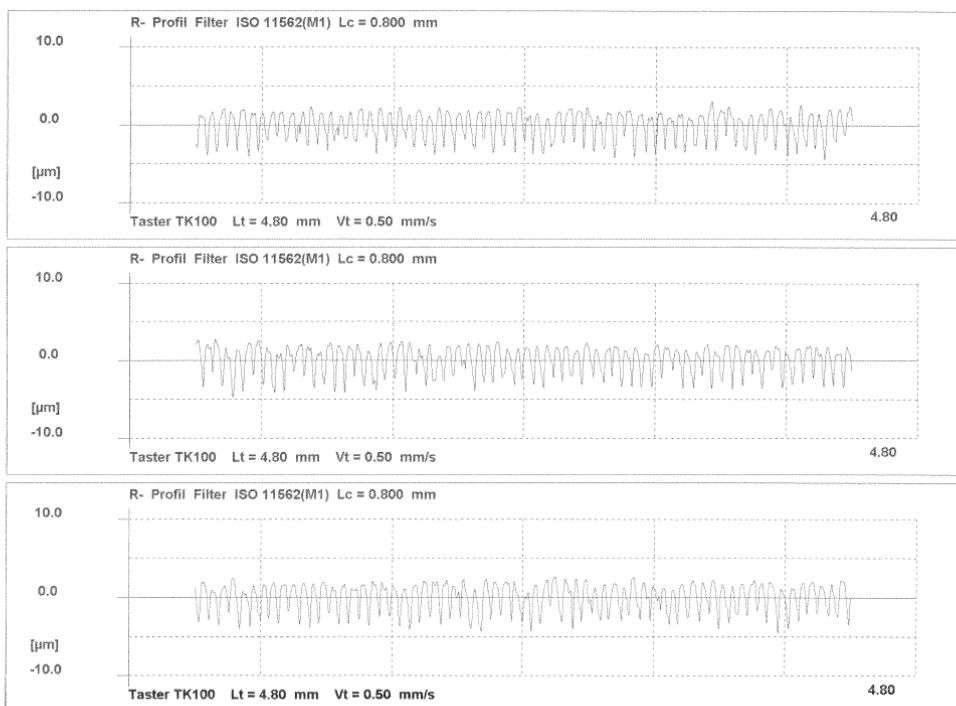
Messobjekt
Probennummer
Werkstoff
Information
Taster-Nr.
Prüfer

Stempel
E
PTFE
gedreht
TKL100-1606
O/Shd

HOMMELWERKE
TURBO RAUHEIT V6.14
Messbedingungen
Taster-Typ : TK100
Messbereich : 80 μm
LV: waveline 60
Taststrecke : 4.80 mm
Geschwindigkeit : 0.50 mm/s
Lc (Cut Off) : 0.800 mm
Filter : ISO 11562(M1)
Lc / Ls: 100
Tasterfaktor: AUS

16.07.07
D:\T8000\Daten-Rauheit\Shd2007\Geowiss\Probe
E-PTFE-gedreht1009.pip

Liste Kenngrößen					Statistik n = 9				
Nr.	Ra	Rz	Rt	Rp	Nr.	Kenngrößen Xq	Range	S	
1	1.433	6.639	6.957	2.727	1	Ra	1.445	0.109	0.031
2	1.385	6.560	7.570	2.702	2	Rz	6.628	0.411	0.113
3	1.494	6.738	7.227	2.786	3	Rt	7.338	0.613	0.227
4	1.426	6.562	6.988	2.311	4	Rp	2.726	0.756	0.188
5	1.468	6.806	7.537	2.643					
6	1.480	6.666	7.523	2.853					
7	1.427	6.584	7.419	3.067					
8	1.449	6.395	7.552	2.766					
9	1.441	6.700	7.272	2.679					



Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Alle Stellen, die die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Darmstadt, den

Dipl.-Ing. Ulrich Burbaum

Curriculum Vitae

Dipl.-Ing. Ulrich Burbaum

Geburtsdatum und -ort:

25. Mai 1968 in Duisburg

Schule, Bundeswehr, Hochschulausbildung:

1974 – 1987: Grundschule und Gymnasium in Düsseldorf, Abschluss: Abitur

1987 – 1988: Grundwehrdienst bei der Bundeswehr in Münster

1988 – 1994: Studium des Bauingenieurwesens an der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen,
Schwerpunkt: Baubetrieb, Massivbau, Tunnelbau,
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufliche Tätigkeiten:

1987: Baustellenpraktikum bei der Firma Bergfort, Essen

1991 – 1994: Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Baumaschinen und Baubetrieb an
der RWTH Aachen

1994 – 1999: Projektingenieur im Ingenieurbüro Wittke Beratende Ingenieure in Aachen

1999 – 2002: Projektleiter im Ingenieurbüro ARCADIS in den Standorten Darmstadt,
Amersfoort (Niederlande) und Erfurt

2002 - 2005: Leiter der Abteilung Grundbau und Tunnelbau im Ingenieurbüro
CDM Consult GmbH in Alsbach

seit 2005: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Geowissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

seit 2008: Mitglied des Prüfungsausschusses zur Fachkraft "Bohrungen für geothermische
Zwecke und Einbau von geschlossenen Wärmeüberträger-Systemen
(Erdwärmesonden)"